

Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)

Luftvorwärmung für Wärme- **pumpen in Erdregistern**

Phase 1, Kosten - Nutzen - Analyse

ausgearbeitet durch

Arthur Huber
Christoph Müller
Oliver Berchtold

Huber Energietechnik,
Ingenieur- und Planungsbüro SIA
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich

H. J. Eggenberger
Trainingszentrum - Wärmepumpen
Liestalerstrasse 33, 4414 Füllinsdorf

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Zusammenfassung

Die Mehrheit der 1995 in der Schweiz verkauften Heizungswärmepumpen nutzen die Umgebungsluft als Wärmequelle. Das Grundproblem dieser Anlagen liegt darin, dass immer dann, wenn am meisten Wärme benötigt wird, am wenigsten Wärme zur Verfügung steht. Um diese Schere zwischen Wärmeangebot und Nachfrage zu verkleinern, kann die Umgebungsluft bei tiefen Lufttemperaturen in einem Luft-Erdregister (LER) vorgewärmt werden.

In der vorliegenden Arbeit soll zunächst ein kurzer Ueberblick über die in der Schweiz geplanten und realisierten Erdregister-Anlagen geboten werden (Stand der Technik), wobei auch Anlagen miteinbezogen sind, die primär der Kühlung und Luftvorwärmung der Frischluft einer Lüftungsanlage dienen.

Im Hauptteil dieser Arbeit wird das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern untersucht und mit Schotterkoffern und Erdsonden-Wärmepumpenanlagen verglichen. Der Vergleich wird in zwei Schritten durchgeführt: Zunächst in einem Grobvergleich exemplarisch anhand von 18 imaginären Anlagen (konventionelles und Niedrigenergie-Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus), wobei die Investitionskosten der Wärmequellen aus realisierten Anlagen abgeleitet sind, und der Nutzen (Stromeinsparung) grob geschätzt wird. In einem zweiten Schritt werden Modelle aufgestellt, womit Erdregister simuliert, und der Nutzen der Vorwärmung quantifiziert werden kann. Die Modelle wurden im Rahmen einer Diplomarbeit am Laboratorium für Energiesysteme der ETH Zürich von Roland Rütli und Stefan Remund mit alternativen Modellen aus der Literatur verglichen und anhand von Messungen validiert.

Der Grobvergleich zeigt auf, dass richtig dimensionierte Erdregister etwa gleich viel kosten wie vergleichbare Erdsonden- und Erdregisteranlagen, dass damit bei den heute erhältlichen Wärmepumpen die Arbeitszahl einer Erdsondenanlage aber nicht ganz erreicht werden kann.

Die Diplomarbeit ergab, dass sich der Nutzen eines Erdregisters am besten durch die Simulation des Erdreiches mit dem Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM-Modell) berechnen lässt. Die in der Literatur publizierten, analytischen Modelle hingegen können eher für eine Grobdimensionierung der Register und für Plausibilitätsprüfungen herangezogen werden.

In einer Simulation mit dem kommerziellen Wärmepumpenprogramm YUM und dem WKM-Modell wurde der Nutzen der Luftvorwärmung für eine taktende Wärmepumpe in einem Erdregister quantifiziert. Mit der Vorwärmung lassen sich etwa 10% Strom einsparen, wobei 1/3 der Verbesserung auf das Konto der kleineren Wärmepumpe geht, die dank dem Erdregister eingesetzt werden kann (geringere Anfahrverluste).

Bei drehzahlgeregelten Wärmepumpen ist der Nutzen der Erdregister noch etwas grösser, da damit der lastangepasste Betrieb ausgeweitet und auf einen technischen Speicher verzichtet werden kann.

Eine aktive Regeneration des Erdregisters mit Aussenluft lohnt sich höchstens dann, wenn die Wärmepumpe aus Tarifgründen primär nachts betrieben werden soll, also dann, wenn die Lufttemperaturen den tiefsten Wert des jeweiligen Tages haben.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

In einer zweiten Simulation wurde der Frage nachgegangen, ob in einem Gebäude mit einer Lüftungsanlage ein Erdregister nicht mit Abwärme aus der Fortluft wiederaufgeladen werden soll, und sich der Nutzen für eine Heizungswärmepumpe so vergrössern lassen könnte. Dies ist zwar tatsächlich möglich, reduziert aber das Kühlpotential des Erdregisters. Da physikalisch bedingt „Kälte“ immer teurer ist als „Wärme“ (2. Hauptsatz der Thermodynamik), sollte der Betrieb dieses Erdregisters auf den Kühlbedarf des Gebäudes optimiert werden, was meist gegen die Regeneration der Erdregister mit Fortluft spricht.

Um den besten Kosten-Nutzen-Effekt für die Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern zu erreichen, sollten die Erdregister relativ klein dimensioniert werden. Ziel sollte es dabei sein, auf den heute meist üblichen Elektro-Heizstab monoenergetischer Anlagen verzichten zu können. Ein nicht vorhandener Heizstab wird auch nie „ungewollt“ in Betrieb sein..

Erdregister sind, verglichen mit Erdwärmesonden, noch keine Standardanlagen. Dementsprechend sind die bereits realisierten Erdregister in der Regel noch nicht auf Kosten optimiert. Ein Sparpotential liegt z.B. beim Verzicht auf das Kiesbett oder den Magerbeton, sowie beim Verzicht auf Rohrkrümmer und die Verwendung von Standard-Sammelkanälen. Eine Bauanleitung für Erdregister mit konstruktiven Details, Kostenzusammenstellung und Dimensionierungshinweisen könnte die heute noch bestehenden Unsicherheiten in der Abklärungsphase der Machbarkeit eines Projektes wesentlich erleichtern, ganz unabhängig davon, ob dieses Erdregister nun primär für die Kühlung oder für die Luftvorwärmung gebaut werden soll.

Diese Arbeit wurde in verdankenswerter Weise von der folgenden Arbeitsgruppe begleitet:

- Hr. Baumgartner Ingenieurbüro für Haustechnik, Dübendorf
- Hr. Eggenberger Trainingszentrum Wärmepumpen, Füllinsdorf
- Hr. Hohl Saurer Thermotechnik AG, Arbon
- Hr. Spoehrle Erte Ingenieurs Conseils SA, Carouge

Im weiteren danken wir Herrn Dr. Zogg, Programmleiter UAW, für seine konstruktiven Hinweise und das Zustandekommen dieser Arbeit.

Abstract

A cost-benefit analysis of pre-warming the air supply for heat pumps in earth-pipe collectors is carried out. This heating system is compared on the one hand with alternative heat sources for ground-coupled heat pumps, such as boreholes or beds of railway ballast chippings (ballast beds), and on the other hand with ambient air directly used without any pre-warming.

In the first part of this report a survey about the state of the art of earth-pipe collector systems in Switzerland is made.

A first coarse cost-benefit comparison was made by designing 18 exemplary heat pump systems with different heat sources for different types of residential buildings. Their costs and energy savings were compared. The result showed only small differences in the costs, but revealed not surprisingly, that boreholes as heat sources for brine-to-water heat pumps yield the biggest energy savings. Not included in this coarse comparison were air-to-water heat pumps.

To calculate the benefits of earth-pipe collectors more precisely, models were developed to simulate the air supply temperature at the end of the collector. These models were validated by comparing them with measurements and with analytical models found in the literature. This validation was carried out by Stefan Remund and Roland Rütli at the Laboratory for Energy Systems at the ETH, Zürich.

Compared with an air-to-water heat pump without pre-warming, a system with earth-pipe collectors yields a 10% increase in energy savings. One third of this improvement is effected by the use of a smaller heat pump that can be used when the air supply is pre-warmed in the earth-pipe collector. This smaller heat pump has an extended time of operation, what reduces the losses every time the heat pump is starting again.

Recharging an earth-pipe collector in periods when the heat pump is not running and the ambient air is warmer than the earth around the pipes is possible, but is only recommended, when the heat pump should mainly be operated at night. The earth-pipe collector can also be used to cool down the supply air for air-conditioning. In this case recharging of the collector is not recommended. This would reduce the cooling yield. First the system should be optimized for the cooling needs of the building.

Inhaltsverzeichnis

1 AUSGANGSLAGE UND ZIEL DER ARBEIT	5
1.1 Genereller Ueberblick	5
1.2 Ziel der Arbeit	7
1.3 Unvorhergesehene Entwicklungen	8
2 ANLAGENKONZEPTE UND STAND DER TECHNIK	9
2.1 Erdwärmesonden	9
2.2 Schotterkoffer	11
2.3 Erdregister	12
2.4 Monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne Vorwärmung	22
3 KOSTEN - NUTZEN - ANALYSE	23
3.1 Vorgehen	23
3.2 Berechnungsgrundlagen für die Grobanalyse	24
3.3 Ergebnisse der Grobanalyse	28
4 BERECHNUNGSMODELLE UND SIMULATIONEN	30
4.1 Vorgehen	30
4.2 Monovalente Wärmepumpen im Lastdiagramm	32
4.3 Erdregister - Modelle	41
4.4 Gebäudemodell	51
4.5 Simulation eines Luft - Erdregisters als Wärmequelle	58
4.6 Simulation eines Schotterkoffers als Wärmequelle	66
4.7 Systemsimulation eines Erdregisters mit Lüftungsanlagen	74
5 VALIDIERUNG DER ERDREGISTERMODELLE AN DER ETH	83
5.1 Aufgabenstellung der Diplomarbeit	83
5.2 Anlagenbeschreibung der Validierungsobjekte	84
5.3 Messungen am Erdregister Bromberg in Laufen	85
5.4 Validierung des WKM-Modells	86
5.5 Validierung des analytischen Modells	87
5.6 Validierung des Ghazi/Müller-Modells	87
5.7 Zusammenfassung der Resultate	88
6 AUSBLICK	89
7 SYMBOLVERZEICHNIS	90
8 LITERATURVERZEICHNIS	92
9 ANHANG	94

1 Ausgangslage und Ziel der Arbeit

1.1 Genereller Ueberblick

1.1.1 Monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpen

Luft als Wärmequelle für Wärmepumpen ist jederzeit und überall gratis verfügbar. Nicht erstaunlich ist deshalb, dass die Luft-Wasser-Wärmepumpe in der Schweiz die am häufigsten eingesetzte Wärmepumpenart ist. Monovalente Luft-Wasser- und Luft-Luft-Wärmepumpen haftet aber der Makel an, dass sie während der kältesten Witterung -- dann wenn die meisten Wärme gebraucht wird -- den schlechtesten Wirkungsgrad haben. Diese Schere zwischen Wärmebedarf und Wärmeangebot führt zu sehr gross dimensionierten Wärmepumpen und zu sehr kurzen Laufzeiten der Wärmepumpe bei wärmeren Aussentemperaturen.

1.1.2 Monoenergetische Luft-Wasser-Wärmepumpen

Da ein Gebäude nur an wenigen Tagen im Jahr überhaupt die Auslegungsleistung benötigt, wird in den meisten Fällen bei Luft-Wasser-Wärmepumpen eine elektrische Zusatzheizung (Widerstandsheizung) eingebaut und die Wärmepumpe entsprechend kleiner dimensioniert. Bei genauerem Hinsehen entpuppen sich also die meisten „monovalenten“ Luft-Wasser-Wärmepumpen als monoenergetische Anlagen. Solche Anlagen haben zwei Probleme:

- Die Zusatzheizung wird immer dann benötigt, wenn die Elektrizitätswerke ihre grössten Lastspitzen haben.
- Die Zusatzheizung wird durch die Anlagensteuerung oft unbemerkt auch dann in Betrieb genommen, wenn sie eigentlich gar nicht benötigt würde (Aufheizspitzen nach Nachtabsenkung, während der Speicherladung bei Anlagen mit Stufenladung, bei schlechter Temperaturschichtung im Speicher für dort angeordnete Heizstäbe, etc.).

1.1.3 Luftvorwärmung im Schotterkoffer

Mit einer Luftvorwärmung kann die Wärmepumpe ohne Zusatzheizung monovalent ganzjährig betrieben werden. Bereits realisiert sind in der Schweiz einige Anlagen, die diese Luftvorwärmung mit einem Schotterkoffer erreichen wollen (EFH in Hämikon, Betriebsgebäude EKZ in Regensdorf, EFH in Truttikon, EFH in Dänikon, Schulhaus in Hirzel). Das grundsätzliche, physikalische Problem dieser Schotterkoffer liegt aber im ungünstigen Oberflächen-Volumenverhältnis dieses Schotter-Speichersystems: Die Schotter-Oberfläche ist im Verhältnis zum Speichervolumen der Schottersteine viel zu gross. Die Eindringtiefe für periodische Lade-Entladezyklen liegt für Tageszyklen in festen Gesteinen bei ca. 1m, für Jahreszyklen bei ca. 20m. Die maximal mögliche Eindringtiefe im Schotterkoffer ist aber durch die Durchmesser der Schottersteine begrenzt. Dies hat zur Konsequenz, dass ein Schotterkoffer in der Regel in 3 Ladesegmente aufgeteilt werden kann: Ein bereits geladener Teil, ein relativ schmales Segment, wo gerade geladen wird und ein noch ungeladener Teil

Um eine gleichmässige Durchströmung der Schotterkoffer zu gewährleisten, muss ausserdem immer ein minimaler Druckabfall von 200 - 400 Pa eingehalten werden (Eugster und Hopkirk, 1994). Dies führt zu einem nicht zu vernachlässigendem Strombedarf für die Ventilatoren.

Schotterkoffer müssen prinzipiell aktiv mit Aussenluft regeneriert werden, da die Luft zwischen den Schottersteinen gegenüber dem darunterliegenden Erdreich isolierend wirkt. Ein Schotterkoffer ist also kein „Erdwärmekollektor“, sondern primär ein „Puffer“ für die Aussenluft.

1.1.4 Erdwärmesonden

Die Solentemperatur einer Erdwärmesondenanlage sinkt auch an kalten Tagen nur wenig ab. Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdsonden können dementsprechend kleiner dimensioniert werden als monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpen. Dafür nützen sie die Erwärmung der Umgebung im Januar bis März nur mit einer gewissen Verzögerung. In dieser Zeit kommt es oft vor, dass die Bodentemperatur unter die Lufttemperatur absinkt.

Mit der entsprechenden Wärmepumpe kann zwar auch mit einer Erdsondenanlage das Brauchwasser erwärmt werden. Die Quellentemperaturen liegen dabei aber in der Regel im Sommer wesentlich tiefer als die Aussenluft-Temperaturen. Ausserdem muss dafür die Erdsonde grösser dimensioniert werden, da bei einem zusätzlichen Sommerbetrieb die mögliche Entzugsleistung pro Meter Sonde sinkt. Dies alles verteuert die Anlage.

Erdwärmesonden sind bewilligungspflichtig und dürfen in Gewässerschutz-Zonen A und S in der Regel nicht gebaut werden.

1.1.5 Erdkollektoranlagen

Erdkollektoren sind im Erdreich horizontal verlegte Rohre, die mit Sole durchströmt werden und als Wärmequelle für Wärmepumpen dienen. Erdkollektoranlagen unterscheiden sich technisch, ausser in der Wärmequelle, nicht von Erdsondenanlagen. Der hohe Platzbedarf und die Kosten, sowie die in der Regel tiefere Arbeitszahl sprechen meist gegen eine Erdkollektoranlage. Sie werden deshalb in der Schweiz kaum mehr gebaut und werden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

1.1.6 Erdregisteranlagen

Erdregister sind im Erdreich verlegte Rohre, die mit Luft durchströmt werden, um diese zu erwärmen oder zu kühlen.

Im Gegensatz zu den Erdkollektoren, die mit Sole durchflossen werden, werden die Erdregister also mit Luft durchströmt. Die Luft wird darin im Winter vorgewärmt, im Sommer gekühlt. Damit kann eine Erdregisteranlage sowohl als Wärmequelle für eine monovalente Luft-Wasser oder Luft-Luft-Wärmepumpe dienen, als auch zur Vorkonditionierung der Zuluft in einer Lüftungsanlage. Bei richtiger Dimensionierung ist der Druckabfall im Register kleiner als 100 Pa. Erdregister können einschichtig oder mehrschichtig ausgeführt werden. Der Abstand der verschiedenen Schichten ist abhängig von der Eindringtiefe, die ihrerseits von der Frequenz der Lade- und Entladezyklen und dem Material (Erde, Ton etc.) des Speichermaterials abhängt.

Erdregister werden teilweise passiv durch Wärmezufuhr aus dem Erdreich regeneriert, eine aktive Regeneration wie bei einem Schotterkoffer ist somit nicht zwingend.

Im Sommer findet bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit im Erdregister eine gewisse Auskondensation der Zuluft statt. Mit wenig Energie (für die Ventilatoren) kann damit eine im Sommer erwünschte, trockene, kühle Zuluft ohne Klimaanlage erreicht werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Die Idee der Luftvorwärmung für eine monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe ist nicht neu. Bereits sind diverse solche Anlagen mit einem Schotterkoffer oder einem Erdregister gebaut. Zweifelhaft erschien jedoch das Kosten - Nutzen - Verhältnis einer solchen Luftvorwärmung. Argumentiert wurde etwa mit dem geringen Energieinhalt der Speichermasse des Schotters oder des Erdreiches. Eine solche Argumentationsweise greift allerdings zu kurz, da der Schotterkoffer oder das Erdregister pro Winter mehrmals geladen und entladen werden können und da zumindest das Erdregister aus dem darunterliegenden Erdreich passiv wieder aufgeladen werden kann. Ausserdem ist es der Wärmepumpe egal, ob die Wärme schlussendlich aus der Luft (mit oder ohne Zwischenspeicherung im Schotter/Erdreich zur Amplitudendämpfung) oder aus dem Erdreich stammt. Wichtig ist einzig das Temperaturniveau der Luft. Es ist also eine umfassendere Betrachtungsweise des Gesamtsystems notwendig.

Als erstes soll in der vorliegenden Arbeit ein kurzer Ueberblick über den Stand der Technik gegeben werden. Es soll also ermittelt werden, wie es heute gemacht wird und wie es allenfalls besser oder kostengünstiger gemacht werden könnte. Es soll dabei die Frage geklärt werden, wie eine Wärmepumpe optimal in das Gesamtsystem integriert werden soll.

Der eigentliche Kosten - Nutzen - Vergleich ist in 2 Teile gegliedert:

1. Ein Grobvergleich, exemplarisch an 18 imaginären Anlagen. Verglichen werden verschiedene Wärmepumpenanlagen (Erdsonden-, Schotterkoffer- und Erdregister-Wärmepumpen). Als Basis wird die am weitesten verbreitete Technik der Erdwärmesondenanlage genommen. Es werden konventionelle und Niedrigenergie-Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser als Last eingesetzt. Die Kostenschätzung der Wärmequellenanlagen (Erdsonden, Schotterkoffer, Erdregister) wird aus bereits gebauten Anlagen abgeleitet, wobei die Unsicherheit beim Schotterkoffer und Erdregister grösser ist als bei der erprobten Technik der Erdsonden. Der Nutzen wird grob aufgrund der RAVEL-Richtlinien (Gabathuler et al. 1994) geschätzt.
2. Eine detailliertere Simulation zur Quantifizierung des Nutzens der Erdregister.

Für die Simulation werden Erdregister - Modelle aufgestellt, die im Rahmen einer Diplomarbeit am Laboratorium für Energiesysteme der ETH von Roland Rütli und Stefan Remund mit analytischen Modellen aus der Literatur und mit Messungen verglichen werden. Der Nutzen für die Wärmepumpe wird mit dem kommerziellen Programm YUM (Afjei, 1989) quantifiziert.

1.3 Unvorhergesehene Entwicklungen

Im ursprünglichen Projektentwurf war es vorgesehen, zuerst die möglichen Systemkonfigurationen aufzuzeigen und dann daraus die Kosten-Nutzen-Analyse zu erarbeiten. Im Verlauf der weiteren Projektarbeit wurde klar, dass die Vergleichsanlagen mit Erdwärmesonden eine erprobte Technik, die bereits sehr gut optimiert ist, darstellen. Bei den Anlagen mit Erdregistern und Schotterkoffern andererseits stehen wir einer neuen, bei weitem nicht erschöpften und optimierten Technik gegenüber. Für eine sinnvolle Gegenüberstellung dieser Anlagentypen müssen aus all den unzähligen Anlagevarianten die sinnvollen Kombinationen erst herausgeschält werden. Dabei müssen wir prinzipiell zwei ganz unterschiedliche Erdregisteranlagentypen unterscheiden:

1. Gebäude ohne Lüftungsanlage. Erdregister zum Vorwärmen der Zuluft einer monovalenten Luft-Wasser-Wärmepumpe. Ueberbrückung der von den Temperaturen und der Luftfeuchtigkeit her kritischen Aussenluftzustände durch Umluftbetrieb im Erdregister. Aktive Regeneration mit Aussenluft möglich. Keine Kühlung im Sommer. Aktive Regeneration des Erdregisters mit Ueberschusswärme aus dem Gebäude nicht möglich.
2. Gebäude mit Lüftungsanlage. Vorwärmung der Zuluft im Erdregister. Wärmepumpe als WRG eingesetzt. Kühlung im Sommer mit dem Erdregister möglich. Aktive Regeneration mit Ueberschusswärme aus dem Gebäude oder mit Aussenluft bei entsprechender Schaltung möglich.

Die Charakteristik der Anlagen der ersten Art sind einfach zu ermitteln. Dieser Anlagentyp ist direkt mit Erdwärmesondenanlagen vergleichbar. Eine Musteranlage dieser Art steht in Laufen (Abbildung 2-5).

Die zweite Anlagenart ist unseres Wissens in der Kombination mit einem Erdregister und einer Wärmepumpe bis heute noch nicht verwirklicht. Bei diesem Anlagentyp ergeben sich auf der Kostenseite die Einsparungen dadurch, dass einerseits durch den Einsatz des Erdregisters bei entsprechenden Randbedingungen auf eine aktive Klimatisierung gänzlich verzichtet werden kann, und dass andererseits ebenfalls dank dem Erdregister auch die teuren Heizregister in der Zuluft unnötig werden (cf Abbildung 2-8 und Abbildung 2-10). Ausserdem kann unter Umständen dank der Wärmepumpe auf die teure, zentrale Sammlung der Fortluft und den Wärmetauscher verzichtet werden (cf Abbildung 2-15), da die Wärmepumpe als dezentrale Wärmerückgewinnungsanlage arbeitet, wobei der Enthalpiewirkungsgrad der Wärmepumpe als WRG einen konventionellen Plattenwärmetauscher bei weitem übertrifft. Auf der Nutzenseite scheint vor allem die Möglichkeit der aktiven Regeneration ins Gewicht zu fallen (bei entsprechender Schaltung).

Im Laufe der Arbeit wurde ausserdem die Frage aufgeworfen, ob mit heutiger Technik Luft - Wasser - Wärmepumpen nicht auch ohne Vorwärmung monovalent eingesetzt werden können. Das Projekt wurde deshalb dahingehend ausgeweitet, dass in den Vergleich auch diese Anlagenart miteinbezogen wurde. Die aufgeworfene Frage wird zunächst im Lastdiagramm grundsätzlich diskutiert und anschliessend an einem Beispiel mit einer Simulation quantifiziert.

2 Anlagenkonzepte und Stand der Technik

2.1 Erdwärmesonden

In der Schweiz sind bereits ca. 4'000 monovalente Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Erdwärmesonden in Betrieb. Es handelt sich somit um eine erprobte Technik. In der Regel wird das Erdreich um die Erdwärmesonden nicht aktiv wieder aufgeladen. Das Erdreich erreicht am Ende der Heizperiode, etwa im April/Mai, seine tiefsten Temperaturen. Im Laufe des Sommers füllt sich der Temperaturtrichter wieder und erreicht im Herbst das natürliche Temperaturniveau, das bei der Jahresdurchschnittstemperatur der Luft plus 3°C pro 100m Tiefe liegt. Bei richtig dimensionierten Erdwärmesondenanlagen fällt die Soletemperatur in einem Durchschnittsjahr kaum je unter 0°C, damit sind heute Jahresarbeitszahlen von bis zu 4 erreichbar. Die Kosten für eine Erdwärmesonde für ein typisches Einfamilienhaus liegen bei ca. 10'000 Fr. In Wasserschutzonen werden in der Regel keine Bewilligungen erteilt, Böden mit trockenem Sand / Kies als Untergrund eignen sich nicht für Erdwärmesondenanlagen.

In Abbildung 2-1 ist das Grundschaema der Erdwärmesondenanlage abgebildet, das für alle Varianten des Kosten-Nutzen-Vergleichs im Kapitel 3 als Basis (=100%) dient.

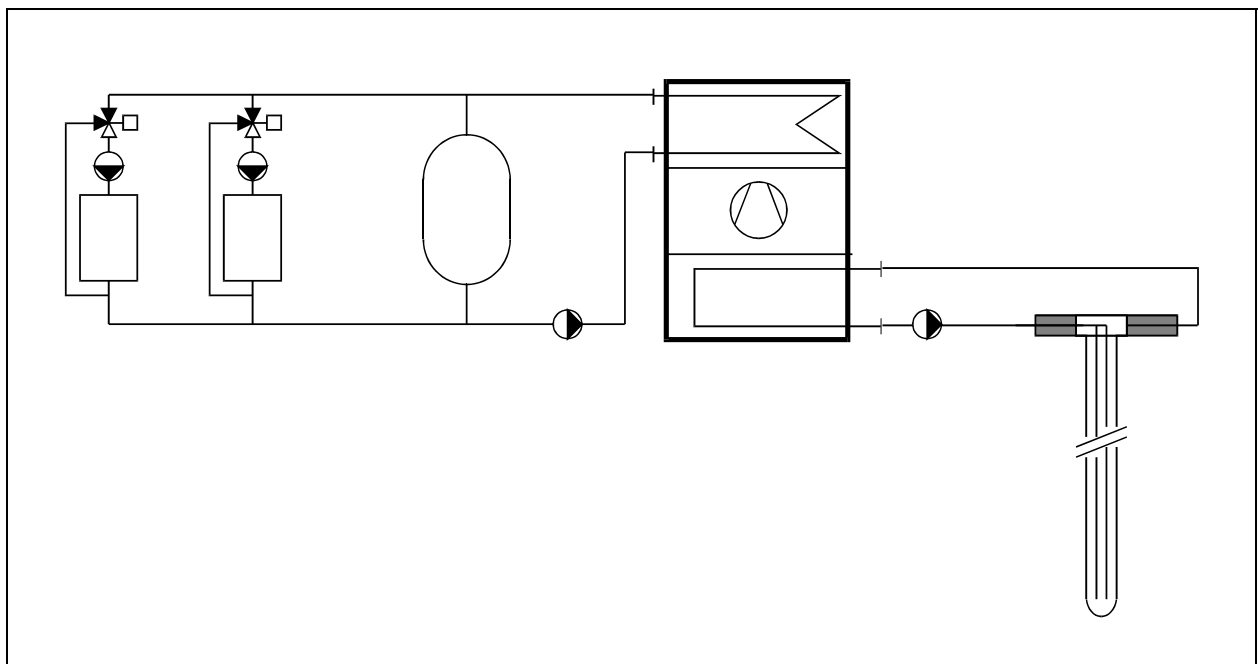


Abbildung 2-1: Schema einer Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage. Standardschaltung nach RAVEL für taktenden Teillastbetrieb. Grundschaema für den Kosten-Nutzen-Vergleich

Fällt ein wesentlicher Anteil des Wärmebedarfs im Sommerhalbjahr an, so entfällt die natürliche Regenerationsphase des Erdreiches. Soll die Wärmepumpe trotzdem mit vernünftiger Arbeitszahl betrieben werden, so muss entweder das Erdreich aktiv wieder aufgeladen (erwärmt), oder die Erdwärmesonde stark vergrößert werden. Die Wiederaufladung ist zum Beispiel mit unverglasten Sonnenkollektoren möglich. Dies führt aber sehr schnell zu Mehrkosten bei der Investition, die in der gleichen Höhe liegen wie die Erdwärmesonde alleine. In immer besser wärmegeprägten Gebäuden ist es vor allem der Warmwasserbedarf, der einen zunehmenden Anteil am Gesamtwärmebedarf auch im Sommer ausmacht und zu einer aktiven Regeneration zwingt.

Bei einer klassischen Erdwärmesondenanlage dient auch dann die Erde als Wärmequelle, wenn die Lufttemperaturen weit höher sind als die Erdreichtemperaturen. Dies ist im Heizfall vor allem in den Monaten März bis Mai der Fall, und für die Warmwasseraufbereitung meist auch in den Sommermonaten.

Besitzt das Gebäude eine Lüftungsanlage, so könnte eine Erdwärmesonde theoretisch sowohl zum Kühlen der Zuluft im Sommer (mit oder ohne Wärmepumpe), wie auch zum Heizen mit der Wärmepumpe im Winter eingesetzt werden. Der apparative Aufwand dazu ist allerdings beträchtlich. Dazu sind Heiz- und Kühlregister (Wasser-Luft-Wärmetauscher) in die Lüftungskanäle einzubauen, deren Luftwiderstand für die Ventilatorleistung nicht vernachlässigt werden kann. Ausgeführt werden solche Anlagen in der Regel nur dann, wenn für das Gebäude sowieso eine Pfahlgründung nötig ist, die dann als Erdsonden ausgebildet werden (z.B. Max-Planck-Institut in Berlin).

Erdwärmesonden-Anlagen in Kombination mit einem Luftheizsystemen kommen in der Schweiz kaum vor. In einem konventionell gebauten Gebäude würde dies einen grossen Luftwechsel und/oder hohe Zulufttemperaturen bedingen. Beides ist aus energetischen Gründen kaum sinnvoll. Um die Lüftungsverluste zu minimieren, kommt man kaum um einen gewissen Umluftanteil herum. Prüfwert wird ein Luftheizsystem höchstens bei Niedrigenergie- und Einfamilienhäusern, wo ein Umluftanteil weniger problematisch ist. In Abbildung 2-2 ist das dem Kosten-Nutzenvergleich zugrundeliegende Schema einer Erdwärmesondenanlage mit Luftheizung abgebildet.

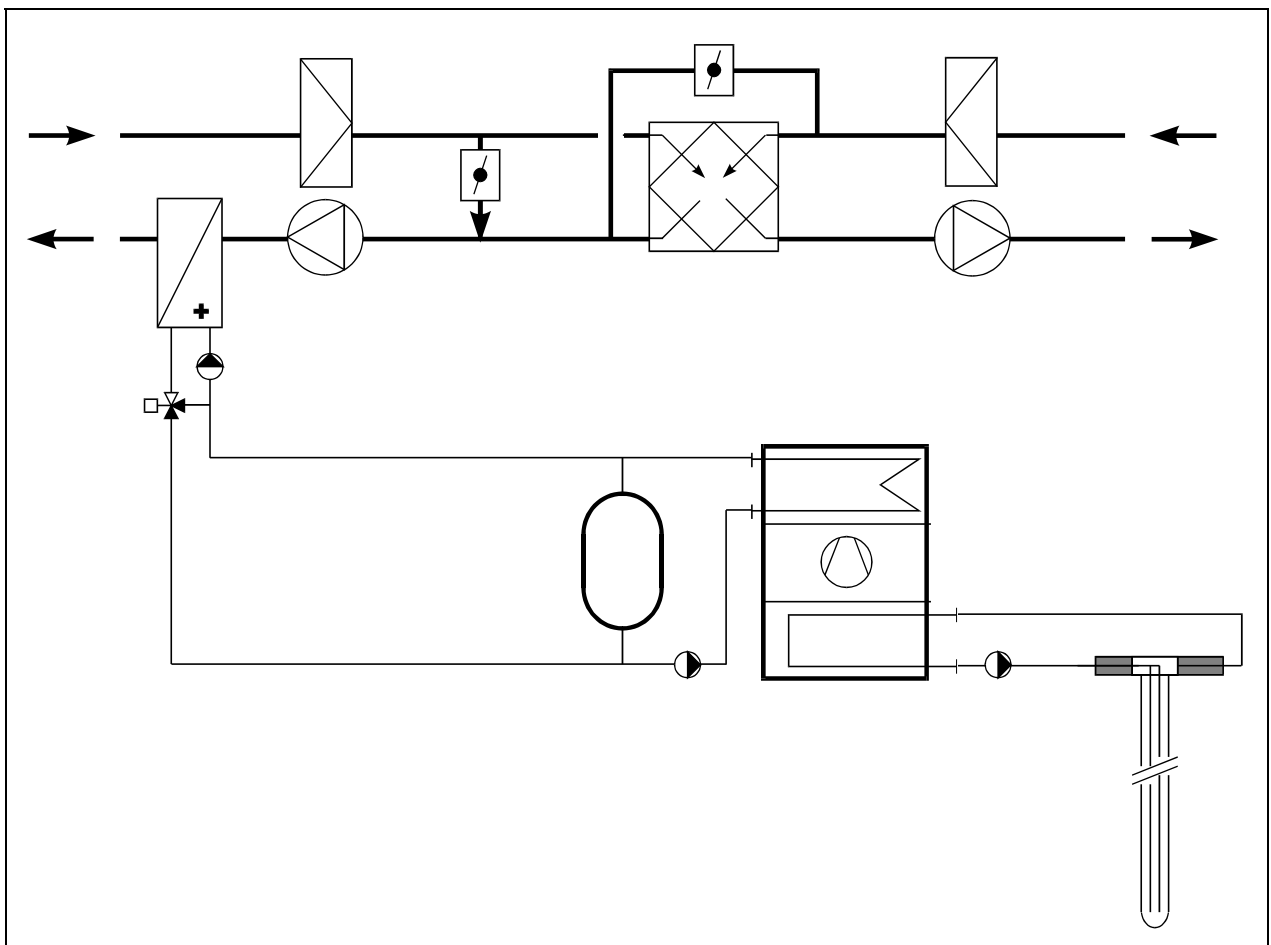


Abbildung 2-2: Luftheizung mit Umluftanteil. Monovalente Wärmepumpe mit Erdwärmesonde.

2.2 Schotterkoffer

Mit einer Luftvorwärmung kann eine Luft-Wasser-Wärmepumpe monovalent ganzjährig betrieben werden. In der Schweiz sind bereits einige dieser Anlagen realisiert. Bei manchen davon wird die Luft für die Wärmepumpe immer durch den Schotterkoffer angesaugt, bei anderen nur dann, wenn der Schotter wärmer ist als die Aussenluft. Nicht klar ist bei der zweiten Art, wie dieser Schotterkoffer regeneriert wird. Eine Regeneration aus dem Erdreich dürfte dabei vermutlich eine geringere Rolle spielen als bei den Erdregistern, da die Luft zwischen den Steinen isolierend wirkt. Eugster et al. (1994) haben bei ihren Untersuchungen an einem Schotterkoffer in Regensdorf einerseits einen Wärmefluss aus dem Keller des Gebäudes und andererseits einen Wärmetransport über eindringendes Wasser aus der Erde in den Schotter festgestellt. Beides kann nicht als Gewinn betrachtet werden. Die eindringende Feuchtigkeit führt zu grösseren Abtauverlusten in der Wärmepumpe, der Wärmefluss aus dem Keller kühlt das Gebäude ab und vergrössert so den Heizbedarf. Wird die Luft immer durch den Schotterkoffer angesaugt, so verhält sich dieser wie ein grosser Puffer, der die Temperaturspitzen der Luft bricht. Dabei wird die Luft aber etwa gleich häufig abgekühlt wie erwärmt. Für die Wärmepumpe zahlt sich dies trotzdem aus, da diese kleiner dimensioniert werden kann und weil unser System kein lineares Verhalten aufweist.

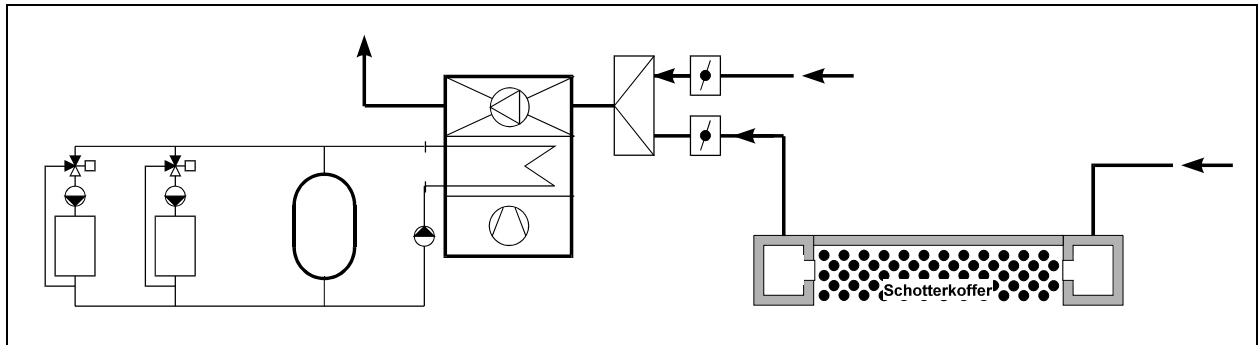


Abbildung 2-3: Schema einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Schotterkoffer

Ein weiterer Problempunkt der Schotterkoffer besteht im zusätzlichen Druckverlust, der vom Ventilator der Wärmepumpe überwunden werden muss. Ein nach den Empfehlungen von Eugster et al. (1994) dimensionierter Schotterkoffer weist einen Druckverlust von 200 - 400 Pa auf, was etwa 2 bis 4 mal mehr ist als in einem Erdregister. Dies verschlechtert die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe.

Das grundsätzliche, physikalische Problem dieser Schotterkoffer liegt im ungünstigen Oberflächen-Volumenverhältnis des Schotter-Speichersystems: Die Schotter-Oberfläche ist im Verhältnis zum Speichervolumen der Schottersteine zu gross. Die Eindringtiefe für periodische Lade-Entladezyklen liegt für Tageszyklen in festen Gesteinen bei ca. 1m, für Jahreszyklen bei ca. 20m. Die maximal mögliche Eindringtiefe im Schotterkoffer ist aber durch die Durchmesser der Schottersteine begrenzt. Dies hat zur Konsequenz, dass ein Schotterkoffer in der Regel in 3 Ladesegmente aufgeteilt werden kann: Ein bereits geladener Teil, ein relativ schmales Segment, wo gerade geladen wird und ein noch ungeladener Teil. Obwohl also immer nur ein kleines Segment aktiv an der Luftherwärmung / Luftkühlung beteiligt ist, muss trotzdem immer der ganze Schotterkoffer durchströmt werden. Um den Luftwiderstand nicht zu gross Anwachsen zu lassen, werden die meisten Schotterkoffer somit mit einer sehr kleinen Luftgeschwindigkeit durchströmt.

Das Anlagenschema einer Schotterkoffer-Anlage unterscheidet sich prinzipiell nicht von einer Erdregister-Anlage. Ein Beispiel eines solchen Schemas ist in Abbildung 2-3 finden.

2.3 Erdregister

Im Gegensatz zu den Erdkollektoren, die mit Sole durchflossen sind, werden die Erdregister mit Luft durchströmt. Die Luft wird darin im Winter vorgewärmt, im Sommer gekühlt. Damit kann eine Erdregisteranlage sowohl als Wärmequelle für eine monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe, als auch zur Vorkonditionierung der Zuluft in einer Lüftungsanlage dienen. Bei richtiger Dimensionierung ist der Druckabfall im Register kleiner als 100 Pa. Erdregister können einschichtig oder mehrschichtig ausgeführt werden (cf Abbildung 2-4: zweischichtiges Erdregister). Der Abstand der verschiedenen Schichten ist abhängig von der Eindringtiefe der Temperaturschwankungen der Luft, die ihrerseits von der Frequenz der Lade- und Entladezyklen und dem Material (Erde, Ton etc.) des Speichermaterials abhängt.

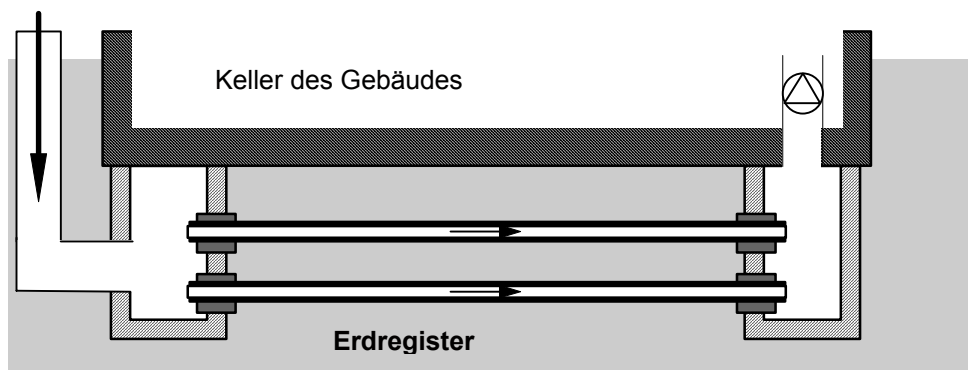


Abbildung 2-4: Mögliche Anordnung eines zweischichtigen Erdregisters unter dem Gebäude

Wärme- und Kälteentzugsleistung sind prinzipiell von der Speicherkapazität eines Erdregisters unabhängige Größen. Die Speicherkapazität wird durch die Masse des Erdreichs (bestimmt durch die Dimensionen und die Eindringtiefe der Lade- und Entladezyklen) definiert, die Wärmeleistung vor allem durch die Oberfläche der Registerrohre und deren Anordnung.

Erdregister haben eine beschränkte thermische Speicherkapazität. Für eine reine saisonale Speicherung ist diese in der Regel zu gering. Da aber das natürliche Temperaturniveau im Erdreich tiefer als 5-10m (Eindringtiefe der Jahresschwankungen) immer der Jahresdurchschnittstemperatur entspricht (Zürich ca. 10°C), entsteht beim Wärmeentzug (und analog bei der Kühlung im Sommer) ein Temperaturrichter, wodurch eine **natürliche Regeneration** des Erdregisters stattfindet. Dadurch kann der Wärmeentzug über die ganze Heizperiode 5 bis 10 mal grösser werden als die eigentliche „Wärmekapazität“ des Erdregisters.

Entscheidende Leistungsgewinne können mit **aktiver Regeneration** erreicht werden. Das Erdregister kann einerseits mit Aussenluft, oder mit der Abluft einer Lüftungsanlage regeneriert werden. Aktive Regeneration ist speziell bei Tag-Nacht-Speicherung und bei mehrschichtigen Erdregistern zu prüfen.

2.3.1 Erdregister zur Luftvorwärmung von Wärmepumpen

In Abbildung 2-5 ist das Schema einer Erdregisteranlage zu finden, die der Luftvorwärmung für eine Wärmepumpe dient. Realisiert ist eine solche Anlage beispielsweise in Laufen. Da bei dieser Anlage eine drehzahlgeregelte Wärmepumpe zum Einsatz kommt, kann in Kombination mit dem Erdregister auf den Pufferspeicher verzichtet werden. Für die Drehzahlregelung wird die Sollwert-Abweichung der Vorlauftemperatur gemessen. Denkbar wäre auch eine Messung der Rücklauftemperatur. Bei drehzahlgeregelten Wärmepumpenanlagen darf keine der RAVEL-Standardschaltungen (Gabathuler et al. 1994) benutzt werden, da diese im Teillastbetrieb zum Takten führen. Der Umluftbetrieb ist eine Spezialität dieser Anlage.

An diesem Erdregister wurden die Modelle des Kapitels 4 validiert. Die Resultate dieses Vergleichs sind im Kapitel 5 dieses Berichtes zu finden.

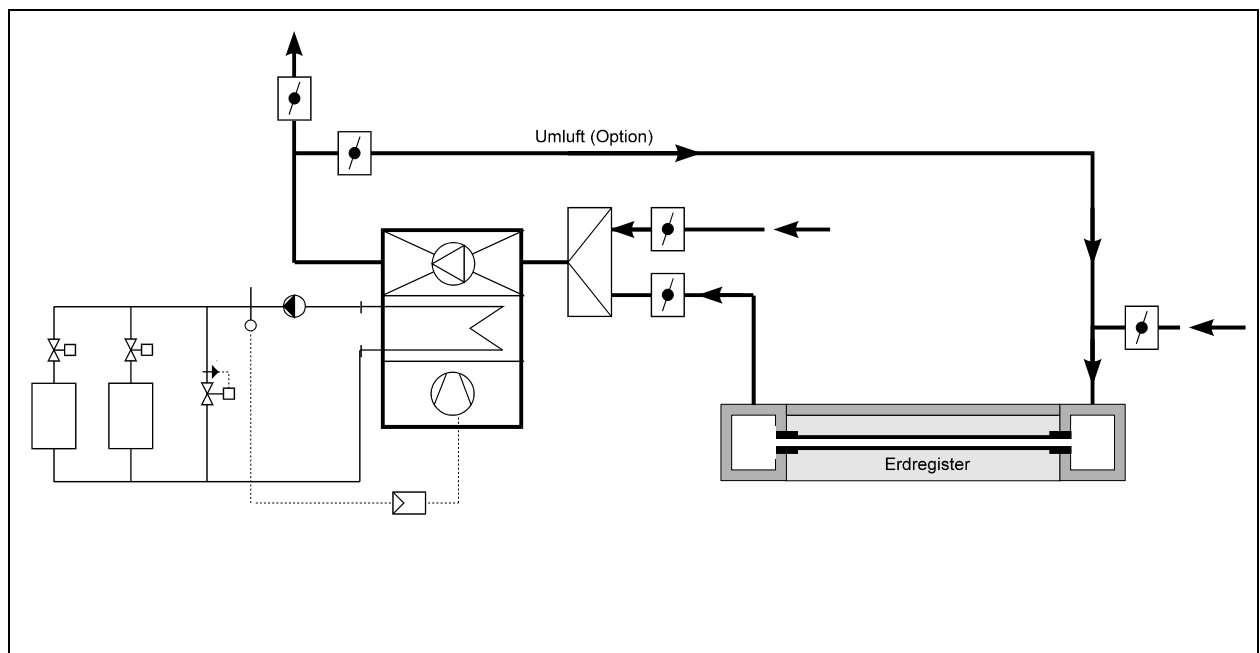


Abbildung 2-5: Schema der Erdregisteranlage Bromberg in Laufen. Drehzahlgeregelte Wärmepumpe ohne Speicher.

Für den Kosten-Nutzen-Vergleich im Kapitel 3 wurde eine konventionelle, taktende Wärmepumpenanlage mit Puffer-Speicher verwendet. Das Schaltschema entspricht dabei im wesentlichen der Abbildung 2-3, wobei anstelle des Schotterkoffers ein Erdregister eingesetzt wurde.

2.3.2 Erdregister zur Kühlung der Zuluft

Bei Bürogebäuden liegt die Hauptmotivation zum Einsatz eines Erdregisters in der Kühlung der Zuluft im Sommer. Die Luftvorwärmung im Winter ist nur ein erwünschter Nebeneffekt. Ziel eines solchen Erdregisters ist es, auf eine aktive Kühlung verzichten zu können. Beispiele solcher Anlagen sind der Schwerzenbacherhof (cf. Abbildung) oder ein Bürogebäude in Esslingen. Der Schwerzenbacherhof wurde als Pilotanlage ausgemessen (cf. Baumgartner et al., 1993). Der Schlussbericht zu diesem Messprojekt soll Ende 1996 erscheinen.

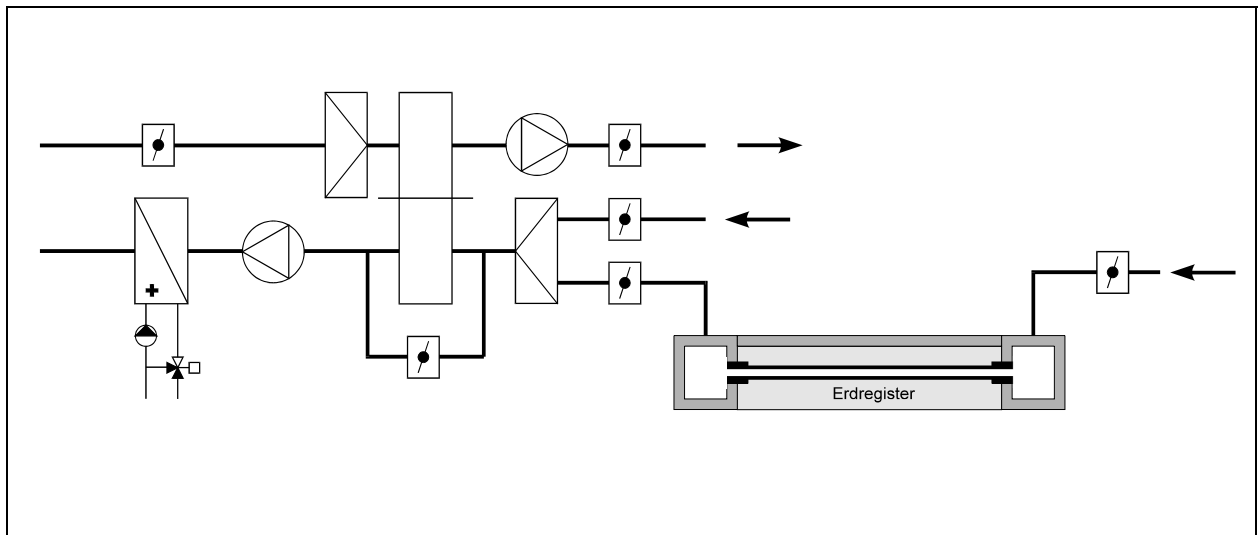


Abbildung 2-6: Vereinfachtes Schema der Erdregisteranlage in einem Bürogebäude in Schwerzenbach. Erdregister zum Kühlen im Sommer und Vorwärmen der Zuluft im Winter

Ein weiterer, positiver Nebeneffekt dieser Erdregister ist, dass der Wärmetauscher kaum mehr vereist. Der in Abbildung 2-5 eingezeichnete Bypass der Wärmerückgewinnung wird nur noch aus energetischen Gründen (Sommerfall) benötigt.

Haben wir die Wahl, eine Anlage auf „Kälte“ oder „Wärme“ zu optimieren, so entscheiden wir uns dabei für die „Kälte“, da „Kälte“ immer teurer zu produzieren ist als „Wärme“.

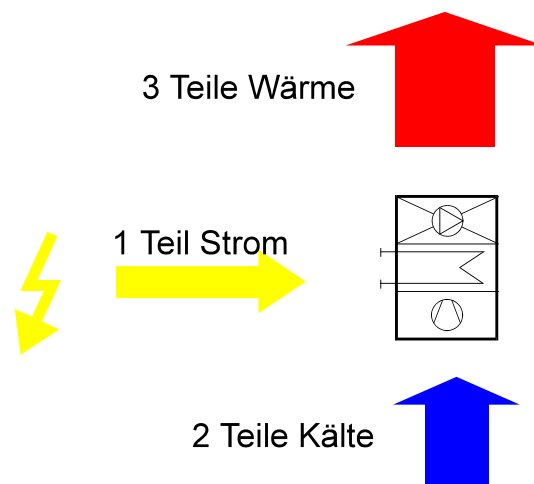


Abbildung 2-7: Bei einem COP von 3 kann mit einer Wärmepumpe aus einem Teil Strom 2 Teile "Kälte" und 3 Teile "Wärme" hergestellt werden. „Kälte“ ist somit wertvoller als „Wärme“

2.3.3 Erdregister zur Luftvorwärmung einer Lüftungsanlage

Wohnungslüftungen werden im modernen Wohnungsbau immer häufiger eingesetzt. Damit kann eine Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) eingesetzt und so der Heizenergiebedarf gesenkt werden. Ausserdem hat die luftdichte Bauweise und die verbrauchsabhängige Heizkostenabrechnung zu einem ungenügenden, natürlichen Luftwechsel und damit zu steigender Luftfeuchtigkeit in den Wohnungen geführt, womit das Bauschaden-Risiko gestiegen ist. Diesem Risiko wird mit einer kontrollierten Wohnungslüftung entgegengewirkt. Dank einem vorgeschalteten Erdregister können diese Wohnungslüftungen ohne Heizregister ausgeführt werden, ohne dass dadurch die WRG vereist oder dass es zu unangenehmen Zugserscheinungen in den Wohnungen kommt (cf. Abbildung 2-8). Die Kühlung im Sommer ist dabei ein erwünschter Nebeneffekt.

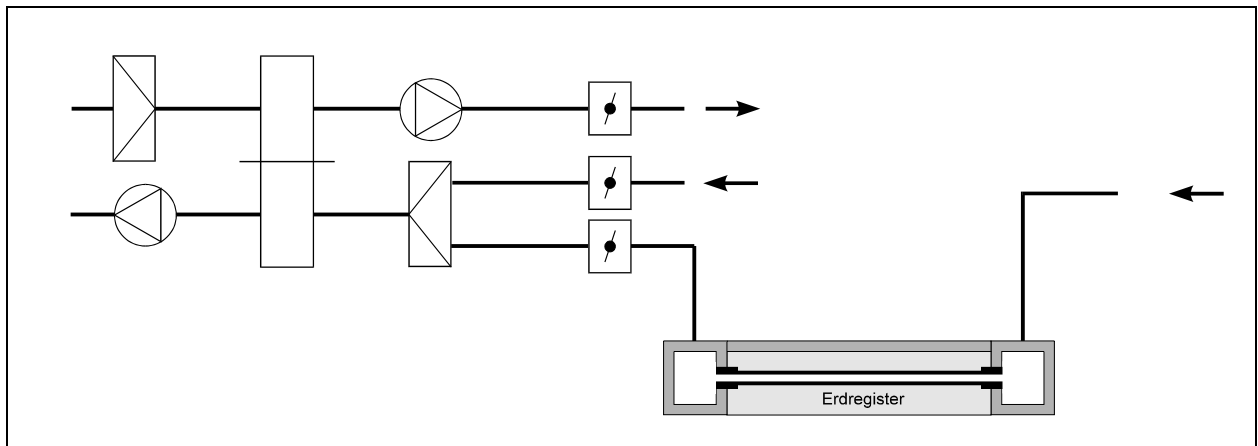


Abbildung 2-8: Ersatzluftanlage mit Erdregister, Mehrfamilienhaus Eichrüti, Hüneberg

Noch nicht Stand der Technik ist die aktive Regeneration des Erdregisters mit Abluft. In der Uebergangszeit könnte die Leistungsfähigkeit des Erdregisters so noch erhöht werden. Die mögliche Schaltung einer solchen Anlage ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

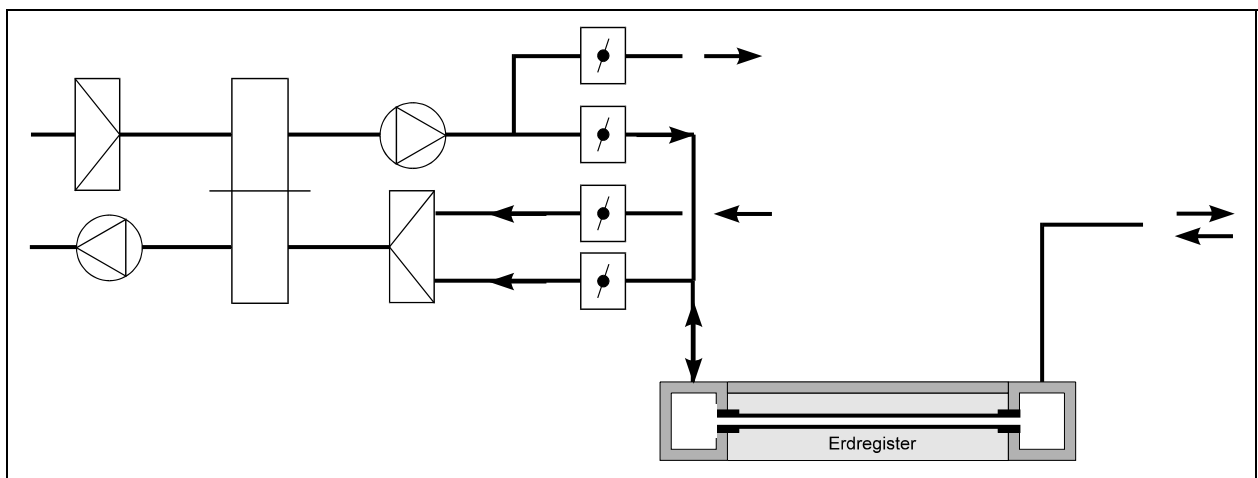


Abbildung 2-9: Mögliche Schaltung einer Ersatzluftanlage mit Erdregister, das aktiv mit Fortluft regeneriert werden kann

Bei verschiedenen Gebäuden wird die Abluft durch eine Unterflur-Garage ausgeblasen (cf. Abbildung 2-10). Damit kann zusätzlich die separate Garagen-Lüftung eingespart werden. Da

die Abluft nach der WRG im Winter immer noch wärmer ist als die Aussenluft, wird die Garage in der Regel so nicht kälter als bei einer separaten Lüftung. Teilweise ist das Erdregister direkt unter der Garage gebaut. Der Wärmestrom von der Garage ins Erdregister gewinnt so einen Teil der Restwärme der Abluft zurück.

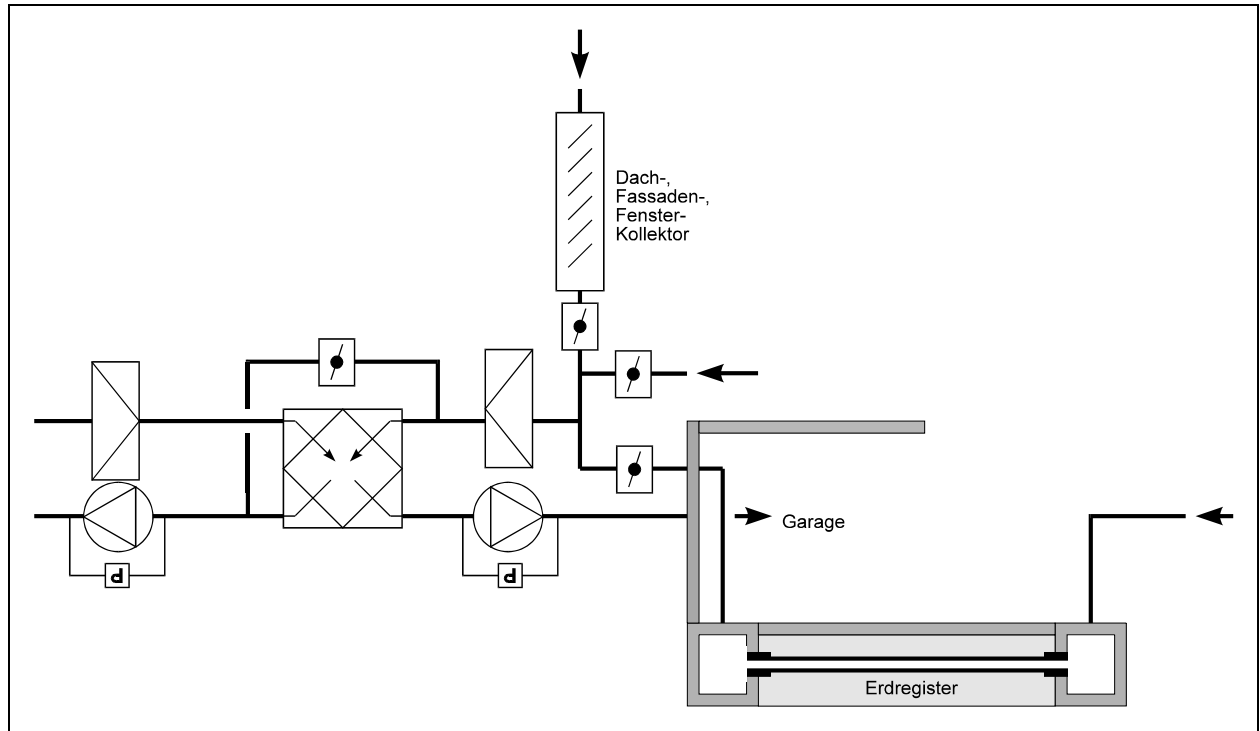


Abbildung 2-10: Ersatzluftanlage mit Erdregister in Mehrfamilienhaus in Carouge. Frischluft entweder über Dach, direkt von aussen oder über Erdregister. Abluft über Garage.

Als Spezialität der Erdregister-Anlage in Carouge (cf. Mermoud et al., 1996) kann die Frischluft nicht nur durch das Erdregister oder direkt von aussen, sondern auch unter dem Dach angesaugt werden, womit auch teilweise die dort anfallende Sonnenenergie genutzt werden kann.

2.3.4 Erdregister für Lüftungsanlage und Wärmepumpe

Die in diesem Abschnitt dargestellten Schemata entsprechen nicht dem Stand der Technik, sind in dieser Form unseres Wissens auch noch nirgends realisiert. Grundgedanke der folgenden Überlegungen war es, die Vorteile der in den Abschnitten 2.3.1 - 2.3.3 beschriebenen Systeme zu kombinieren. Wie sieht also das Schema einer Anlage aus, bei der ein Erdregister im Sommer kühlt und im Winter die Frischluft vorwärmt und gleichzeitig als Wärmequelle für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe dient, mit der das Gebäude beheizt werden kann? Eine von vielen möglichen Schaltungen dieser Art ist in Abbildung 2-11 dargestellt. Diese Anlage (ohne Heizregister in der Zuluft) wurde im Rahmen dieser Arbeit mit den im Kapitel 4 beschriebenen Modellen simuliert. Interessiert hat dabei insbesondere die Frage, ob durch eine aktive Regeneration des Erdregisters durch die Restwärme der Abluft der Wärmeertrag des Erdregisters im Winter entscheidend vergrößert werden kann und wie sich diese Wiederaufladung auf die Kühlleistung des Erdregisters auswirkt. Die Resultate dieser Simulation sind detailliert im Kapitel 4 beschrieben.

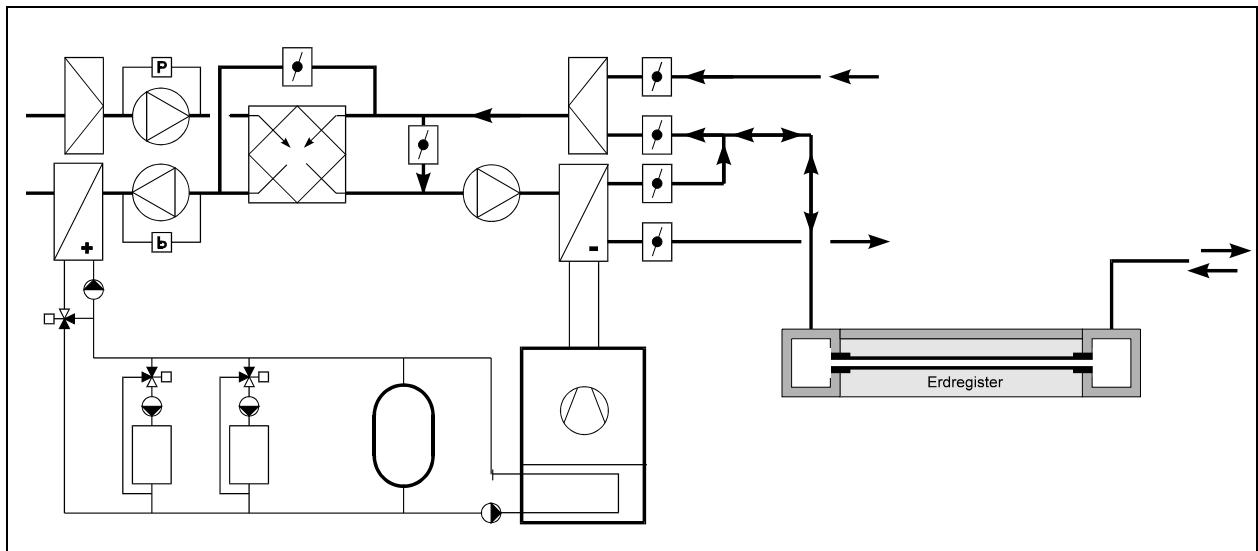


Abbildung 2-11: Mögliche Schaltung einer Lüftungsanlage mit Erdregister und Wärmepumpe. Aktive Regeneration des Erdregister mit Abluft möglich

Bei der in der Abbildung 2-11 beschriebenen Schaltung sind u.a. die folgenden Problempunkt zu beachten:

1. Beim Einsatz handelsüblicher Wärmepumpen ist die benötigte Luftmenge 2 bis 4 mal grösser als für eine Hygienelüftung einer Ersatzluftanlage üblicherweise benötigt würde. Das Erdregister muss dabei auf den grösseren Luftvolumenstrom, also auf die von der Wärmepumpe benötigte Luftmenge dimensioniert sein.
2. Bei Bürogebäuden wird die Lüftungsanlage am Wochenende und in der Nacht meist abgeschaltet. Die Fortluft steht in dieser Zeit nicht als Wärmequelle zur Verfügung.
3. Im Teillastbereich sollte die Wärmepumpe möglichst nicht taktend, sondern lastangepasst betrieben werden können, um die Restwärme der Fortluft vollständig nutzen zu können.
4. Die Fortluft besitzt in der Regel eine wesentlich höhere Luftfeuchtigkeit als die Aussenluft. Im Winter kann die Fortluft somit nicht unter den Gefrierpunkt abgekühlt werden, will man ein Vereisen des Verdampfers verhindern. Eine Analyse im h-x-Diagramm zeigt, dass dieses Problem auch nicht durch Beimischung eines grösseren Anteils von Aussenluft gelöst wird.

Höhere Wirkungsgrade lassen sich mit Wärmepumpen als WRG realisieren (cf Abbildung 2-13). Bei den oben beschriebenen Randbedingungen kann die Fortluft bis auf ca. 1°C abgekühlt werden. Bei tieferen Temperaturen würde das Kondenswasser gefrieren. Bei einer Leistungsziffer von 3.5 der Wärmepumpe kann die Zuluft nur mit der Fortluft als Wärmequelle auf 40°C aufgeheizt werden (statt auf nur 15°C wie bei einem Plattenwärmetauscher). Dies kann bei Niedrigenergiehäusern bereits ausreichend sein, den Wärmebedarf des Gebäudes zu decken. Bei konventionellen Gebäuden ist eine zusätzliche Wärmequelle erforderlich. Nachteilig bei dieser Anordnung ist, dass auch hier die Fortluft mit der Zuluft gekreuzt werden muss oder ein Zwischenkreislauf mit den entsprechenden Verlusten in den Wärmetauschern vorzusehen ist.

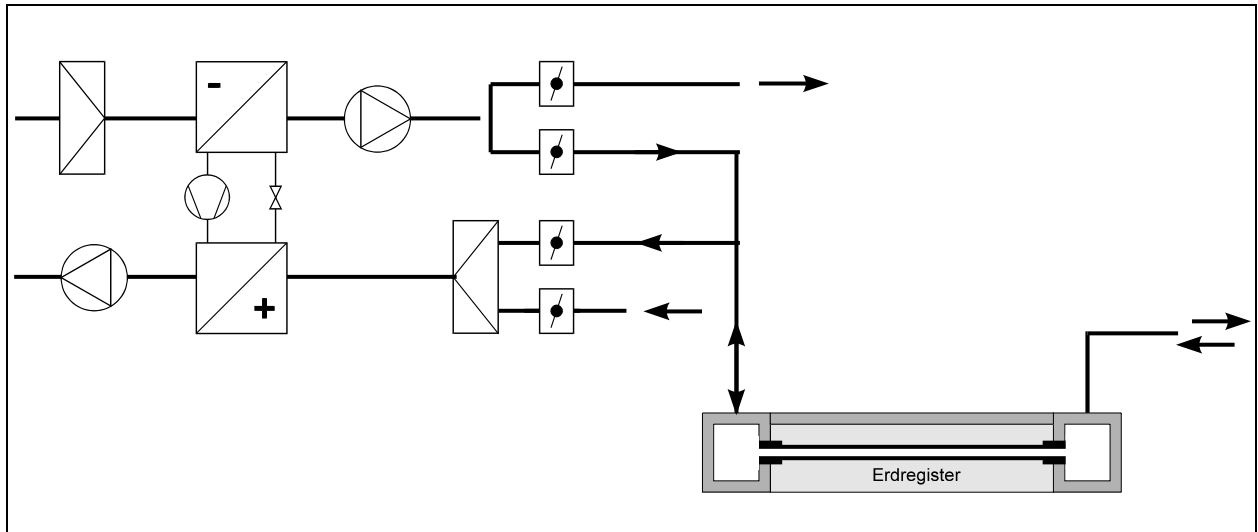


Abbildung 2-13: Mögliche Schaltung einer Lüftungsanlage mit Erdregister. Wärmepumpe als WRG zwischen Zu- und Fortluft

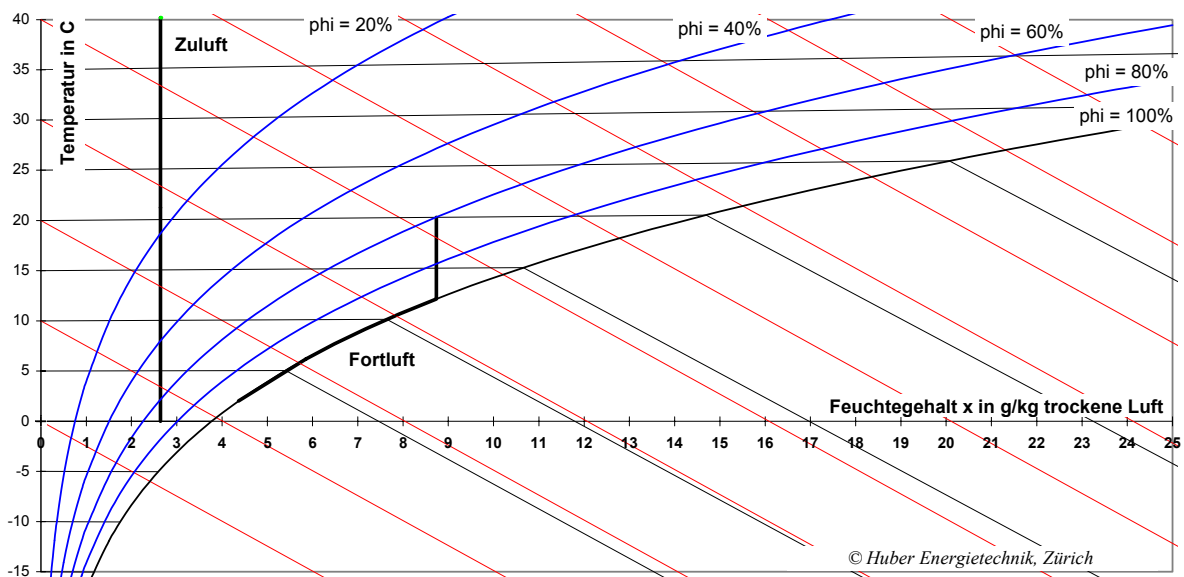


Abbildung 2-14: Mollierdiagramm einer Wärmerückgewinnungsanlage mit Wärmepumpe mit einem COP von 3.5 ohne Vereisung am Verdampfer

Es ist nun aber nicht zwingend, dass mit der Wärmepumpe die Zuluft aufgeheizt werden muss. Die Wärme kann auch in ein hydraulisches Wärmeabgabesystem geführt werden. Damit entfällt

die Notwendigkeit, Zuluft und Fortluft zu kreuzen. Wird dann wie an den Anlagen der Firma Erté in Carouge (Caroubier 19) und Plans-les-Ouates die Zuluft unter den Heizkörpern eingeblasen, so ist auch bei sehr tiefen Aussentemperaturen das Erdregister als Luftvorwärmung (ohne Heizregister) ausreichend. Ausserdem konkurrenzieren sich bei einem solchen System Erdregister und Wärmerückgewinnungsanlage nicht.

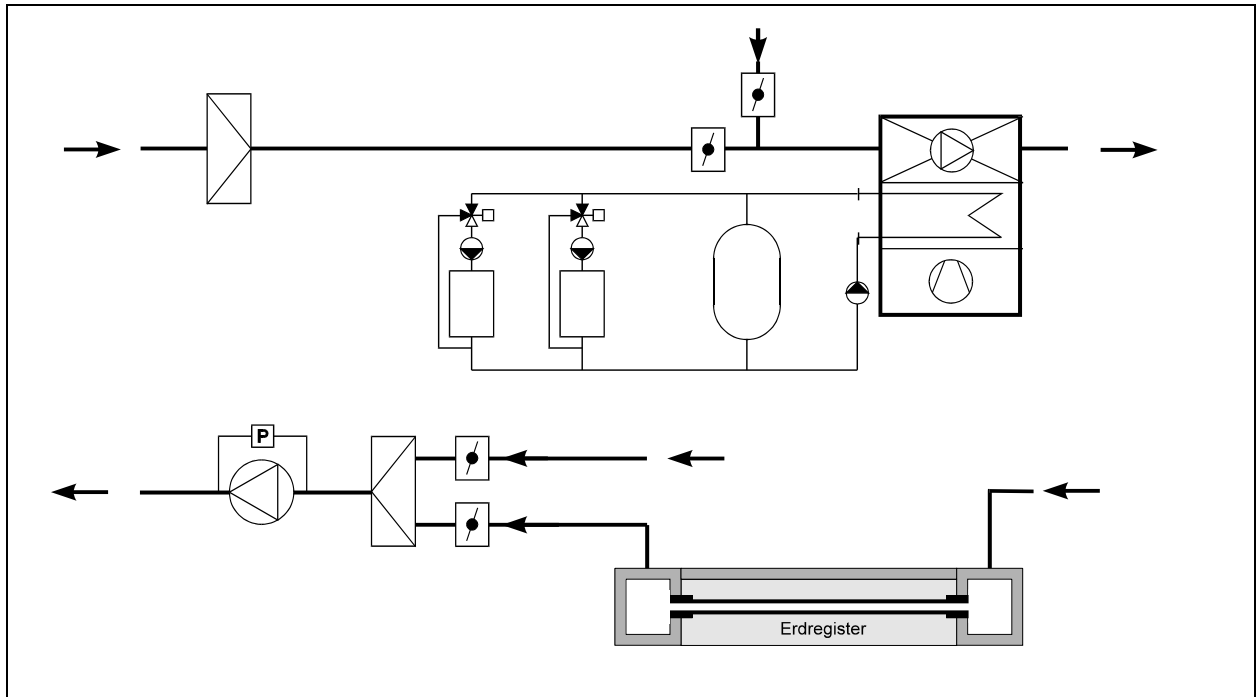


Abbildung 2-15: Mögliche Realisierung des Konzeptes einer Wärmepumpe als Wärmerückgewinnungsanlage. Keine Heizregister in der Zuluft (Lufteinlass unter den Heizkörpern)

2.3.6 Erdregister in Gewächshäusern

Bei Gewächshäusern fehlt in der Regel die Speichermasse. Ueberschusswärme des Tages kann nicht in die Nacht hinein gespeichert werden. Das Erdregister ersetzt in einer solchen Konstruktion die fehlende, wirksame Gebäudemasse. Diese Erdregister werden alle mit der Ueberschusswärme des Tages aktiv regeneriert. In der Schweiz sind verschiedene solcher Gewächshäuser als Versuchsanlagen in Betrieb (cf. Abbildung 2-16, Gewächshaus im Technikum Wädenswil). Die Wärmeabgabe in der Nacht geschieht teilweise passiv durch die Erde an die Oberfläche, teilweise aktiv durch Umluftbetrieb des Ventilators. Die Ladung des Erdregisters am Tag wird durch die Auskondensation von Wasserdampf an der Rohr-Innenoberfläche unterstützt.

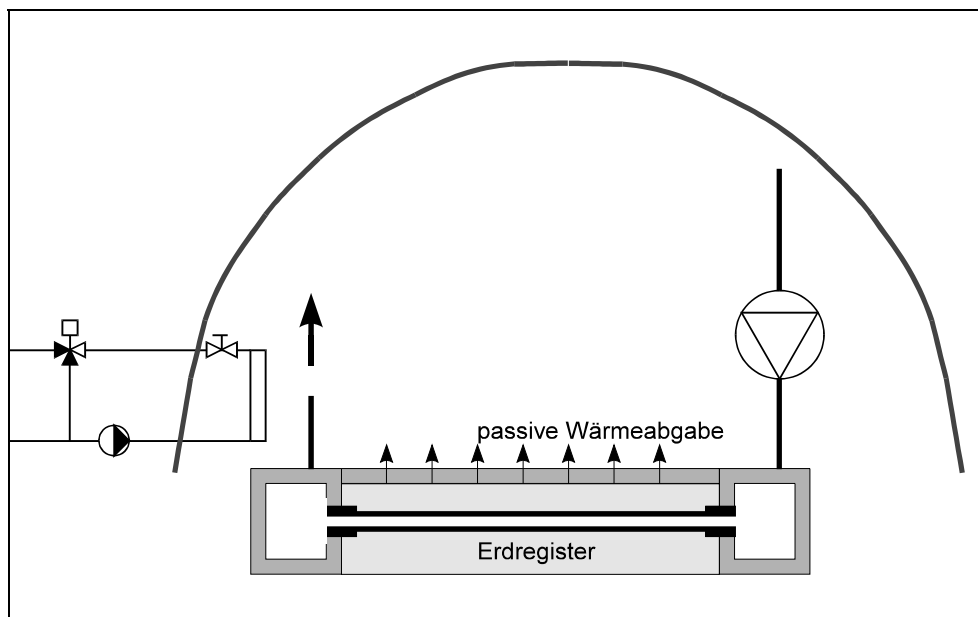


Abbildung 2-16: Schema einer Erdregisteranlage in einem Treibhaus (Technikum Wädenswil)

Ein sehr grosses Gewächshaus ist die geplante neue Tropenhalle des Zürcher Zoos. Diese Halle hat eine Grundfläche von 90m mal 120m. Die Energiebilanz ergibt selbst bei bedecktem Himmel und 5°C Aussentemperaturen tags noch einen Energieüberschuss, der in die Nacht hinein gespeichert werden kann. Die Solltemperatur tags beträgt 25°C, nachts mindestens 17°C. Aus diesen Randbedingungen wurde ein Erdregister geplant, das aussen möglichst adiabatisch ist (kein Abfließen von gespeicherter Wärme in das darunterliegende Erdreich). Erreicht wird dies durch eine mehrschichtige, möglichst kompakte Konstruktion. Die Frequenz der Be- und Entladung des Registers beträgt 24h, woraus die Eindringtiefe ins Erdreich und damit der Rohrabstand analytisch berechnet werden können. Die Rechenmethode dazu ist im Kapitel 4 beschrieben. Auch bei dieser Anlage wird die Ladung des Erdregisters durch die Auskondensation von Wasser an den Rohroberflächen unterstützt. Das Schema dieser Anlage ist in Abbildung 2-17 dargestellt.

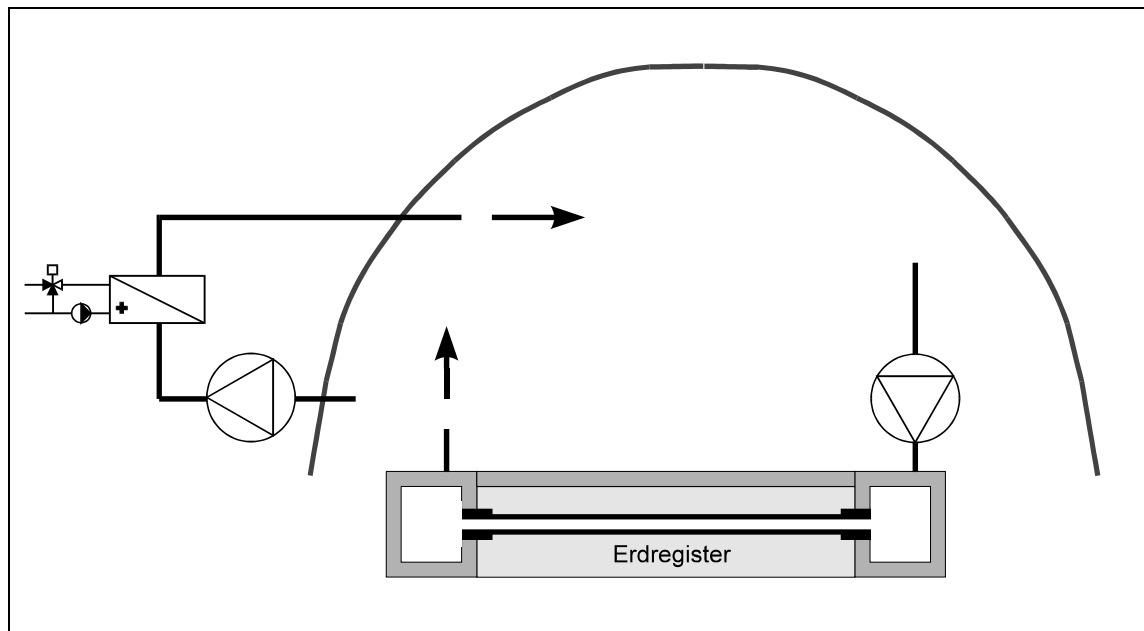


Abbildung 2-17: Erdregister in Tropenhalle des Zürcher Zoos. Adiabates Erdregister mit 7 Rohrreihen übereinander

2.4 Monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpen ohne Vorwärmung

Die Mehrheit der 1995 in der Schweiz verkauften Wärmepumpen sind Luft-Wasser-Anlagen (Angaben der Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung INFEL). Ein kleinerer Teil davon wird bivalent, zusammen mit einem Öl- oder Gaskessel eingesetzt oder in Kombination mit einer Holz-Zusatzheizung. Die grosse Mehrheit der Luft-Wasser-Wärmepumpen wird monoenergetisch, das heisst zusammen mit einem Elektro-Heizstab geplant. Dieser Heizstab wird entweder im Speicher, oder als Durchlauferhitzer gebaut. Echt monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpen sind selten und auch die neuesten Wärmepumpen erreichen die Dimensionierungs-Normen der SIA kaum. Für Zürich fordert die Norm SIA 180 zum Beispiel, dass die monovalente Wärmepumpe noch bei Aussenlufttemperaturen von -14°C den Heizleistungsbedarf des Gebäudes für den Auslegungsfall von -8°C decken können muss. Effektiv dimensioniert wird aber meist auf Aussenlufttemperaturen von -8°C , womit bewusst eine Unterdeckung in Kauf genommen wird. Auf diese Problematik weisen auch Baumgartner et al. (1993) hin. Weitere Hinweise auf den monovalenten Einsatz von Luft-Wasser-Wärmepumpen sind im Kapitel 4 zu finden.

3 Kosten - Nutzen - Analyse

3.1 Vorgehen

Die Kosten/Nutzen Analyse wird in zwei Phasen aufgeteilt. Zuerst werden in einem relativ groben Vergleichsraster eine grössere Anzahl möglicher Anlagen einander gegenübergestellt. Damit können sinnvolle und weniger sinnvolle Anlagenkonzepte voneinander getrennt werden. In einer zweiten Phase werden die besten Anlagen genauer untersucht und eine Anlage wird in ihrem ganzen Verhalten simuliert.

Da in dieser Arbeit nur verschiedene Wärmepumpenanlagen miteinander verglichen werden sollen, kann auf eine Vollkostenrechnung verzichtet werden. Kosten die allen Anlagen gemeinsam sind (z.B. Wärmeverteilsystem) werden im Kostenvergleich nicht aufgeführt.

Folgende Anlagentypen wurden untersucht:

Wärmequelle	- Lufterdregister
	- Schotterkoffer
	- Erdsonde
Gebäudetyp	- Einfamilienhaus, konventionell
	- Einfamilienhaus, niedrigenergie
	- Mehrfamilienhaus
Wärmenutzungsanlage	- hydraulische Heizung
	- Luftheizung

Um einen sinnvollen Kosten/Nutzen-Vergleich für die in dieser Arbeit berücksichtigten Anlagen durchführen zu können, wurde ein Vergleichsraster aufgestellt, in dem für alle Anlagen vergleichbare Berechnungsgrundlagen angewendet wurden. In diesem Zusammenhang wurde ein viel grösserer Wert auf relative Grössenverhältnisse gelegt als auf absolute Zahlen, was sich auf die Vergleichbarkeit nicht negativ auswirken sollte.

Der Nutzen, der durch Vorkühlung der Luft im Sommer erreicht werden kann, wird in der ersten Phase nur qualitativ angegeben.

Energieeinsparungen sind nicht bei den Kosten, sondern als Nutzen ausgewiesen.

Die Ausführlichen Berechnungen der Grobanalyse sind im Anhang dieses Berichtes zu finden.

3.2 Berechnungsgrundlagen für die Grobanalyse

3.2.1 Anlagenauslegung / Kenndaten

Gesamtsystem

Die in den Berechnungsgrundlagen erfassten Anlagen stellen eine Auswahl aller möglicher Systeme dar, welche in einer Schema-Sammlung erfasst wurden. Alle Anlagen in diesem Vergleich werden monovalent betrieben.

Klima

Die Klimadaten sollen zeigen, um welche meteorologische Lage es sich bei der betrachteten Anlage handeln könnte. Die Anzahl der Heizztage dient zur Unterscheidung des Sommer- und des Winterfalles für die Warmwasseraufbereitung.

Gebäude und Verteilsystem

Das energetische Verhalten wird zum einen durch die Jahres-Kennwerte für den Heizenergiebedarf, den Energiebedarf Warmwasser, die beheizte Bruttogeschossfläche, den spezifischen Wärmeleistungsbedarf und zum anderen aus den dynamischen Kennwerten Gewinn/Verlust-Verhältnis γ und Zeitkonstante τ bestimmt.

Den dynamischen Kennwerten γ und τ kommt in der groben Betrachtung nur eine informative Bedeutung zu; sie haben keinen Einfluss auf das Resultat.

Bei der Wärmenutzungsanlage wurden zwei grundsätzliche verschiedene Typen betrachtet: Zum einen die hydraulische Heizung auf mittlerem (Radiatoren) bzw. tiefem (Bodenheizung) Temperaturniveau. Zum anderen eine Luftheizung ohne statisches Heizsystem.

Bei konventionellen Bauten wird von einer Heizung mit Radiatoren ausgegangen (Vorlauf 50°C), während in Niedrigenergiehäusern eine Bodenheizung mit 35°C Vorlauf eingesetzt wird.

Die Anlagen mit Luftheizung wurden für konventionelle Bauten auf eine Zulufttemperatur von 50°C, für Niedrigenergiehäuser von 35°C ausgelegt. Dabei wird mit Umluftbeimischung gearbeitet. Dies ist aus Gründen der Luftqualität nur bei Einfamilienhäusern denkbar. Auf die Betrachtung von Mehrfamilienhäusern mit Umluftbetrieb wurde deshalb verzichtet.

Wärmenutzungsanlage

Der (durchschnittliche) Normalverbrauch pro Person errechnet sich aus dem vorgegebenen Energieverbrauch Warmwasser gemäss SIA 380/1. Die Temperatur im Warmwasserspeicher beträgt dabei 60°C, mit der Wärmepumpe wird von 10°C bis auf 45°C vorgewärmt, den Rest besorgt ein Elektro-Einsatz.

Wärmepumpe

Die eingesetzte Wärmepumpe wird durch ihre Normleistung und die durchschnittliche Leistungsziffer charakterisiert. Diese Werte wurden sowohl für die Luft-Wasser-, als auch für die Sole-Wasser-Wärmepumpe aus den Messungen des Wärmepumpen-Testzentrums Töss abgeleitet. Dabei wurde eine fiktive Maschine genommen, die in allen Dimensionen erhältlich sei und die gemittelten Kennwerte der besten vier momentan erhältlichen Wärmepumpen besitzt. Einfachheitshalber wurde die Kennlinie in der ersten Phase linear angesetzt, wodurch insbesondere die Abtauverluste bei Temperaturen um den Gefrierpunkt nur ungenügend wiedergegeben sind.

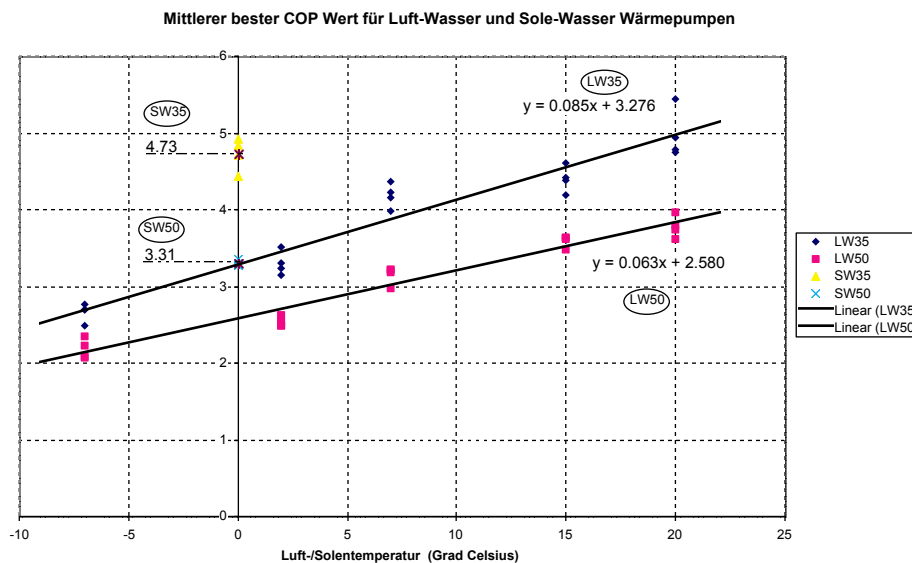


Abbildung 3-1. Idealisierte Wärmepumpenkennlinien für den Grobvergleich der Systeme, abgeleitet aus den 4 besten, 1996 erhältlichen Wärmepumpen (Töss-Kennwerte)

Je nach Schaltung der Anlage werden verschiedene Betriebszustände mit unterschiedlichen COP-Werten definiert: Leistungsziffern Sommer/Winter und Heizung/Warmwasser und entsprechend Sommer- und Winterarbeitszahlen.

Die Quelltemperatur von Erdwärmesondenanlagen wird über das ganze Jahr konstant angenommen (0°C). Der Einfluss der Luftvorwärmung im Lufterdregister bzw. Schotterkoffer wird so gewertet, dass sich die Luft im Schnitt um ca. 5°C erwärmt. Damit wird die durchschnittliche Lufteintrittstemperatur im Winter mit 5°C und im Sommer mit 15°C angenommen.

Die errechneten Betriebsstunden gründen auf der oben gemachten Annahme, dass die Wärmepumpe unter allen Umständen ihre Normleistung abgibt. In der Realität wird dieser Wert etwas anders aussehen, doch das Produkt aus Betriebsstunden und aufgenommener Leistung, welches die Jahresbetriebsenergie darstellt, wird sich nicht wesentlich ändern.

Wärmequellenanlage

Als Wärmequellenanlagen werden Lufterdregister und Schotterkoffer für Luftanlagen, sowie Erdsonden für Soleanlagen in Betracht gezogen.

Der benötigte Volumendurchsatz der Luftanlagen wurde den Wärmepumpen-Hersteller-katalogen entnommen, die Auslegung der Erdregister und Schotterkoffer beruht auf Erfahrungswerten und Schätzungen. So wurden die Erdregister auf 40m Rohrlänge ausgelegt, wobei die Luftgeschwindigkeit im Rohr 6 m/s betragen soll. Für Schotterkofferanlagen wird gemäss EKZ/Eugster 5 m³ Schotter pro kW Heizleistung genommen.

Die Erdsondenanlagen wurden gemäss den AWP-Richtlinien ausgelegt. Neu werden dort auch Anlagen mit ganzjähriger Warmwasseraufbereitung berücksichtigt, wobei je nach Gesamtbetriebszeit der Wärmepumpe eine Auslegung nach Entzugsleistung (50 W/m) oder nach Jahres-Entzugsenergie (130 kWh/m a) empfohlen wird. Die hier betrachteten Anlagen liegen nicht im kritischen Betriebsbereich von über 2000 Betriebsstunden pro Jahr.

3.2.2 Leistungsanpassung

Für diese Untersuchung wird auf eine Leistungsanpassung der Wärmepumpe verzichtet. Die Wärmepumpen werden einfachheitshalber im Ein-Aus-Betrieb bei ganzjährig konstanter Kondensatortemperatur betrieben. Dies entspricht der Mehrzahl der heute eingesetzten Wärmepumpen. Seit kurzem sind Leistungsgeregelte Wärmepumpen erhältlich. Prinzipiell haben diese bei Luft-Wasser-Wärmepumpen den grösseren Spareffekt als Sole-Wasser-Wärmepumpen, da die Wärmequellen-Temperatur bei den letzteren nur sehr wenig schwankt.

Mit den heute erhältlichen Daten aus dem Testzentrum Töss lässt sich das Sparpotential drehzahlgesteuerter Wärmepumpen nicht abschätzen, weshalb in dieser Arbeit auf eine Quantifizierung dieses Effektes verzichtet werden soll.

3.2.3 Berechnung der Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl wurde für den Grobvergleich um 0.5 kleiner angenommen als die durchschnittliche Leistungsziffer des Testzentrums Töss. Dieser Ansatz muss noch überprüft werden. Bei korrekter Planung sollte dieser Abschlag speziell bei Luft-Wasser-Wärmepumpen kleiner sein, da der durchschnittliche Druckabfall im Kondensator und im Verdampfer, sowie die Abtauung des Verdampfers und der Ventilator im Töss-COP bereits mitenthalten ist, bei den Erdsondenanlagen aber noch ein Druckabfall in der Erdwärmesonde dazukommt.

3.2.4 Kosten

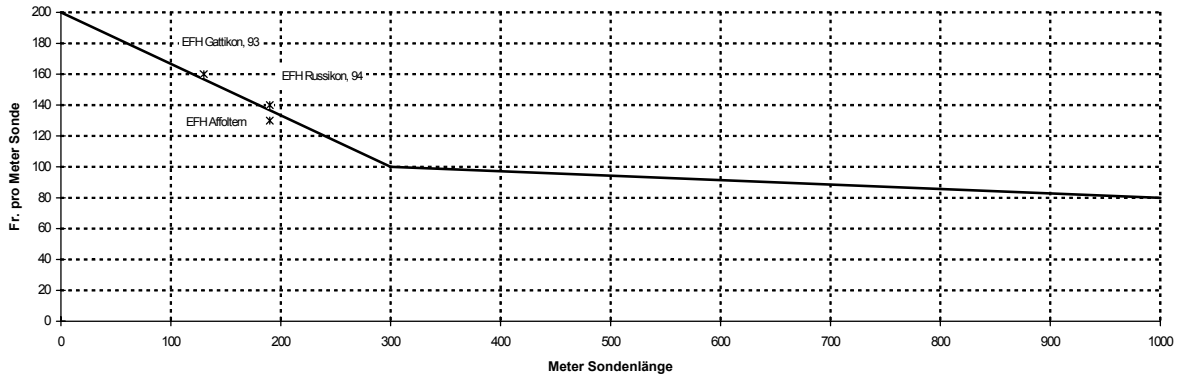
Die pro Anlage entstehenden Kosten werden aufgeteilt in Investitions- und Betriebskosten, wobei bei den Betriebskosten die elektrische Energie explizit ausgeklammert ist und separat behandelt wird. Die spezifischen Kosten der Wärmequellenanlagen wurden aus bestehenden Anlagen abgeleitet, als Diagramme aufbereitet und von der Projektbegleitgruppe diskutiert und genehmigt. Im Sinne der anzustrebenden Vergleichbarkeit scheinen uns diese "Normkosten" ein sehr sinnvolles Instrument.

Die Investitionskosten für Brauchwassererwärmer und Wärmepumpe wurden sehr grob geschätzt. Die Vergleichbarkeit der verschiedenen Anlagen ist durch einheitliche Behandlung gegeben. Bei der Wärmenutzungsanlage wurde die Annahme gemacht, dass sich bei der Lüftungsanlage die Mehrkosten der Luftheizung mit den Einsparungen der Heizkörper aufheben, d.h. dass dadurch keine Mehr- oder Minderkosten entstehen.

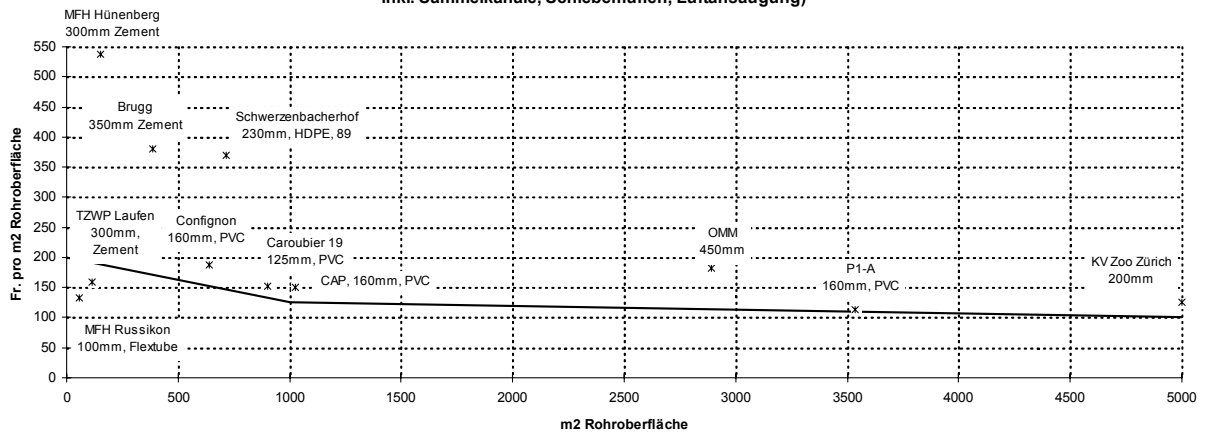
In einer Realwertrechnung werden die Investitionskosten mit der Annuitätenmethode berechnet, wobei mit einem Realzins von 2% gerechnet wird. Die Amortisationszeiten sind, aufgegliedert nach den einzelnen Anlageteilen, gemäss den Richtlinien des Amtes für Bundesbauten (AFB) eingesetzt.

Bei den Betriebskosten sind einzig die Unterhalts- und Wartungskosten, nicht aber die Kosten für die elektrische Energie eingesetzt (diese werden separat ausgewiesen). In Ermangelung besserer Grundlagen wurden die jährlichen Unterhalts- und Wartungskosten als prozentualer Anteil der Investitionskosten gemäss VSSH SI bzw. SIA 380/1 ausgewiesen.

**Investitionskosten Erdwärmesonden, 32mm duplex
(Bohrung, Anschlüsse, Sonde, Mulde, Bewilligungen)**



**Investitionskosten Erdregister
(PVC, keine Krümmer, kein Sandbett,
inkl. Sammelkanäle, Schiebemuffen, Luftansaugung)**



**Investitionskosten Schotterkoffer
(inkl. Sammelkanäle, Luftansaugung)**

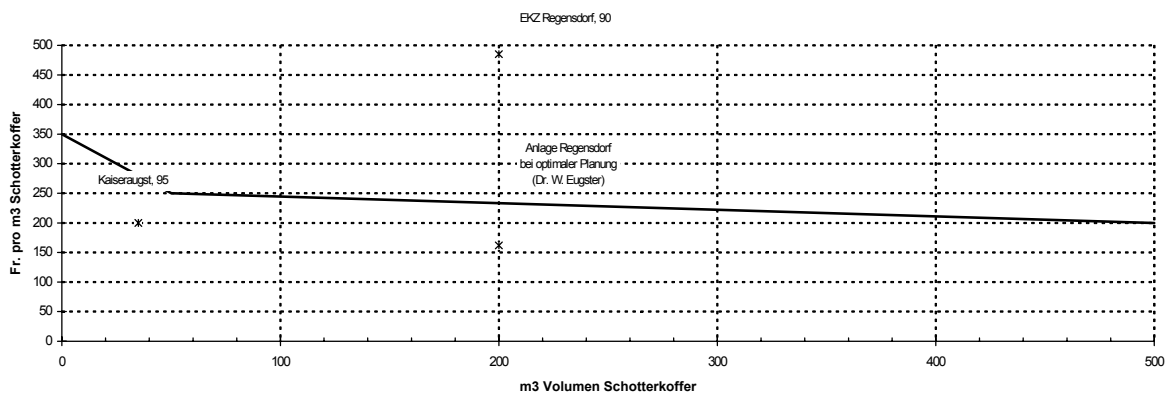


Abbildung 3-2: Schätzung der Investitionskosten der Wärmequellenanlagen, abgeleitet aus bereits realisierten Bauten.

3.2.5 Nutzen

In der vorgegebenen Betrachtungsweise wird vom gleichen Komfortband für alle betrachteten Anlagentypen ausgegangen. Je nach Anlage ist dafür ein grösserer oder kleinerer Energiebedarf erforderlich. Da die Energie bei der Kostenbetrachtung ausgeklammert wurde, kann eine Energieeinsparung (gegenüber einer Referenzanlage mit gleichem Komfortband) als Nutzen ausgewiesen werden.

Als nicht quantifizierter Nutzen kommt im Sommer bei den mit einer Lüftungsanlage gekoppelten Erdregistern die Möglichkeit der Kühlung der Zuluft dazu. Bei einer solchen Betriebsart hat man zusätzlich den Vorteil einer aktiven Regeneration des Erdreiches. In einer zweiten Phase soll in einer Systemsimulation die Kühlleistung auch quantifiziert werden.

3.3 Ergebnisse der Grobanalyse

Im direkten Vergleich der Anlagen sehen wir, dass die Unterschiede weder auf der Kosten- noch auf der Nutzenseite sehr gross sind. Die Grössenordnung der Unterschiede liegt innerhalb der Genauigkeit der Annahmen (cf. Abbildung 3.3).

Der Betriebsaufwand an elektrischer Energie für Erdregister- und Schotterkofferanlagen sind in diesem Vergleich identisch, da das Luftvorwärmungsvermögen in der ersten Phase gleich hoch geschätzt wurde. Schotteranlagen haben gemäss den Dimensionierungsempfehlungen von Eugster/EKZ einen höheren Druckverlust zu überwinden, was hier nicht berücksichtigt wurde. Das effektive Luftvorwärmungspotential der Erdregister und Schotterkoffer wird in der zweiten Phase mit einer Systemsimulation quantifiziert werden.

Zu beachten gilt es, dass speziell bei den Erdregistern sicher noch ein unausgeschöpftes Sparpotential vorhanden ist. Einsparungen lassen sich gegenüber den bereits realisierten Anlagen durch den Verzicht auf das Sand- oder Magerbetonbett und auf teure Krümmer realisieren. Dies ist in dieser Zusammenstellung noch nicht berücksichtigt. Die Kosten der Schotterkoffer basieren auf sehr groben Schätzungen.

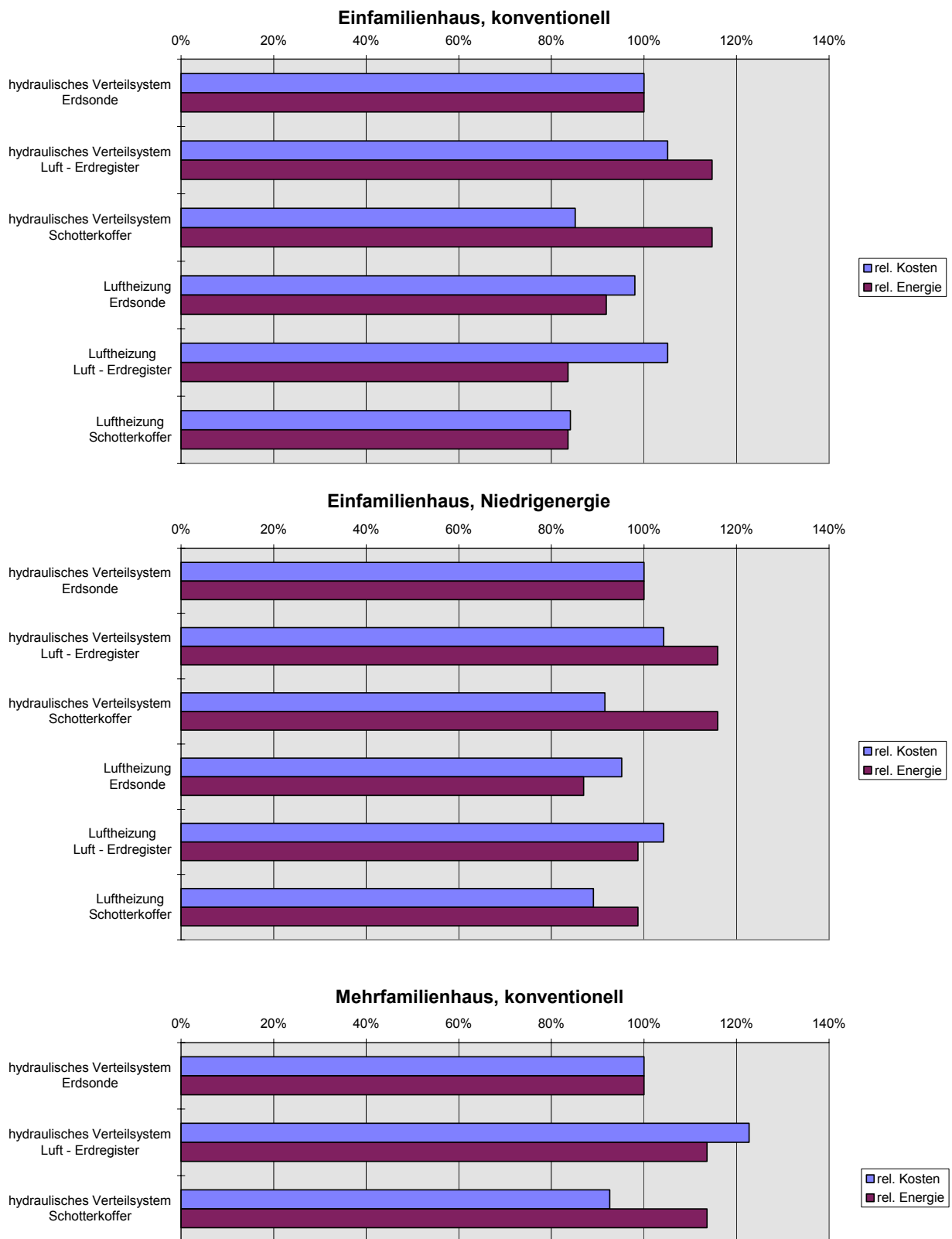


Abbildung 3-3: Vergleich der Jahreskosten und Energiebezüge der untersuchten Anlagen. Die Erdsondenanlage mit statischer Heizung wird als Standard (100%) betrachtet. Die ausführlichen Berechnungen sind im Anhang dieses Berichtes zu finden.

4 Berechnungsmodelle und Simulationen

4.1 Vorgehen

Im Kapitel 3 wurden in einer Grobanalyse Kosten und Nutzen der Luftvorwärmung geschätzt. Im Kapitel 4 soll nun der Nutzen genauer geklärt werden. Dazu wird zunächst im Kapitel 4.2 der Nutzen für verschiedene Fälle im Lastdiagramm analysiert. Für die Quantifizierung werden anschliessend Simulationsmodelle aufgestellt und Anlagen durchgerechnet.

Warum mehrere Erdregister-Modelle?

Ein Erdregister hat prinzipiell zwei Eigenschaften, die je nach Konstruktion mehr oder weniger ausgeprägt sind:

1. Ein Erdregister ist ein Pufferspeicher (Ladung und Entladung durch die strömende Luft im Erdregister. Adiabate Randbedingung im Erdreich).
2. Ein Erdregister ist ein Kollektor für Erdwärme (Nachfliessen von Wärme aus der Tiefe des Erdreiches)

Da in der Regel im Erdreich die Wärmeleitung die Temperaturen im Erdreich bestimmt, beschreiben wir die Vorgänge im Erdreich mit der Wärmeleitungsgleichung (Fouriergleichung). Diese ist linear. Damit können wir unterschiedliche Effekte getrennt behandeln und die Resultate superponieren. Es ist somit möglich, unabhängig voneinander einen analytischen Ansatz für das Puffer-Verhalten und einen zweiten Ansatz für das Kollektor-Verhalten des Erdregisters zu entwickeln und die Ergebnisse zu überlagern. Nicht möglich ist dieses Vorgehen, wenn Grundwasserbewegungen das Verhalten des Erdreiches dominieren. In diesem Fall können die Vorgänge nicht mit der Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden.

Liegt eine grundwasserführende Schicht unter unserem Erdregister, so kann bis zu dieser Schicht mit der Wärmeleitungsgleichung gerechnet werden, wobei an der Grenze zum Grundwasser eine konstante Temperatur als Randbedingung für unser Rechengebiet eingesetzt werden kann (Gazhi, Frank, Baumgartner, 1992)

In Kapitel 4.3 wird zunächst ein analytisches Erdregistermodell zur Beschreibung des Puffer-Verhaltens hergeleitet. Unabhängig davon wird das Erdregister als Luft-Erde-Wärmetauscher mit dem Kennwert NTU beschrieben. Das Gesamtverhalten wird als Summe beider Effekte behandelt.

Die analytischen Modelle eignen sich für eine Klassierung und Grobdimensionierung von Erdregistern. Ausserdem kann damit die Plausibilität der Simulationsmodelle überprüft werden. Die analytischen Modelle eignen sich hingegen weniger, quantitative Aussagen für reale Erdregister zu machen, da die realen Randbedingungen kaum nachgebildet werden können. Es wurde deshalb zusätzlich ein numerisches Simulationsmodell („WKM-Modell“) aufgestellt, das die Wärmeleitungsgleichung nach dem Verfahren von Crank-Nicholson löst. Die Validierung dieses Modells von Rütli/Remund (1996) ergab eine sehr gute Übereinstimmung mit Messungen (cf Kapitel 5).

Welches ist die optimale Betriebsweise für das Erdregister?

Diese Frage soll mit mehreren Erdregister - Simulationen mit dem WKM-Modell geklärt werden. Da eine komplette Systemsimulation den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, beschränken wir uns auf getrennte Simulationen der System-Komponenten Haus / Wärmepumpe / Erdregister ohne dynamische Rückkopplung. Es wird also zunächst die Last (Heizwärme für das Gebäude) berechnet. Zusammen mit einem einfachen Wärmepumpenmodell wird sodann die Laufzeit der Wärmepumpe berechnet. Die Wärmepumpe bestimmt also die Betriebszeiten für das Erdregister. Mit einer Erdregistersimulation sollen anschliessend die folgenden Fragen geklärt werden:

- Wie gross ist ein Erdregister zu dimensionieren?
- Welchen Nutzen hat die aktive Regeneration des Erdreiches mit Aussenluft in der Stillstandszeit der Wärmepumpe (wenn die Luft wärmer ist als die Erde)?
- Wieviel bringt ein Bypass des Erdregisters (wenn die Luft wärmer ist als die Erde)?

Wieviel Nutzen bringt ein Erdregister für eine Wärmepumpe?

Um den Nutzen der Luftvorwärmung für die Wärmepumpe quantifizieren zu können, soll mit dem kommerziellen Wärmepumpen - Simulationsprogramm YUM (Afjei, 1989) ein Vergleich mit einer guten Wärmepumpe mit und ohne Luftvorwärmung angestellt werden. Dabei können zum Beispiel auch die Anfahrverluste mitberücksichtigt werden. Ausgewertet werden soll eine Jahressimulation.

Erhöht sich der Nutzen eines Erdregisters durch eine aktive Regeneration mit Fortluft?

In einem gut wärmedämmten Gebäude mit einer Lüftungsanlage kann es vorkommen, dass die Freie Wärme auch an kalten Tagen zu einer Kühllast führt. Lohnt es sich in einem solchen Fall, das Erdregister mit Fortluft wieder aufzuladen. Da die Antwort zu dieser Frage vor allem in den Auswirkungen auf die Kühlleistung des Erdregisters zu suchen ist, kann für die Wärmepumpe ein ganz einfaches Modell angewendet werden, wodurch eine komplette Systemsimulation möglich wird.

Wie unterscheiden sich Erdregister von Schotterkoffern?

Schotterkoffer sind primär Pufferspeicher und nur in geringem Masse auch Erdwärme-Kollektoren. Dies ist durch die Luft zwischen den Schotter - Steinen, die beim Stillstand der Ventilatoren isolierend wirkt und das grosse Oberflächen-Volumenverhältnis bedingt. Es soll deshalb im Kapitel 4.6 versucht werden, mit einem adaptierten WKM-Modell mit einer adiabaten Rechnung das Verhalten eines Schotterkoffers nachzubilden. Die Rechnung ergab ein sehr ausgeprägtes, gegenphasiges Verhalten. In Messungen in einem Schotterkoffer in Kaiseraugst wurde dieses Verhalten nur sehr beschränkt vorgefunden. Mögliche Ursache dafür ist das Eindringen von Feuchtigkeit aus dem Erdreich in den Schotterkoffer. Dieses Wasser transportiert zwar Wärme, führt aber auch zu grösseren Abtauverlusten in der Wärmepumpe und ist deshalb nicht erwünscht.

4.2 Monovalente Wärmepumpen im Lastdiagramm

Im folgenden soll etwas näher auf die Problematik monovalenter Luft-Wasser-Wärmepumpen eingegangen werden. Um das Verhalten dieser Systeme etwas anschaulicher zu machen, betrachten wir die Kennlinien im Lastdiagramm. Darin wird einerseits die Leistungsabgabe der Wärmepumpe, und andererseits der Leistungsbedarf des Gebäudes in Funktion der Aussenlufttemperatur dargestellt. Der Schnittpunkt dieser beiden Kurven wird Bivalenzpunkt genannt.

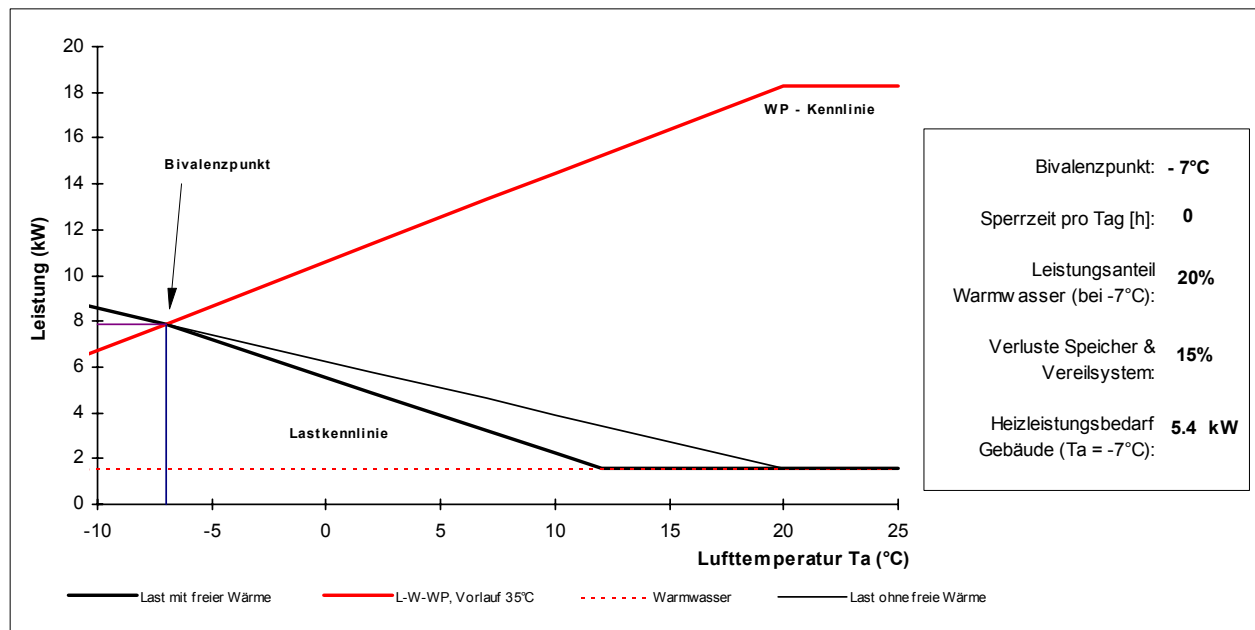


Abbildung 4-1: Bivalenzpunkt einer monovalenten Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Auslegungstemperatur -7°C

Typisch ist für die herkömmliche, monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe die Scherenbewegung der Lastkennlinie und der Wärmepumpenkennlinie: Immer wenn am meisten Wärme benötigt wird, kann von der Wärmepumpe am wenigsten geliefert werden. Um für die Auslegungstemperatur genügend Wärme liefern zu können, muss die Wärmepumpe sehr gross dimensioniert werden (cf. Abbildung 4-1). Im Teillastbereich (wärmere Aussenlufttemperaturen) führt dies zu kurzen Laufzeiten der Wärmepumpe, die dann im Ein-Aus-Betrieb arbeitet. Um trotzdem einigermaßen vernünftige Laufzeiten zu erreichen ist ein Pufferspeicher einzuplanen.

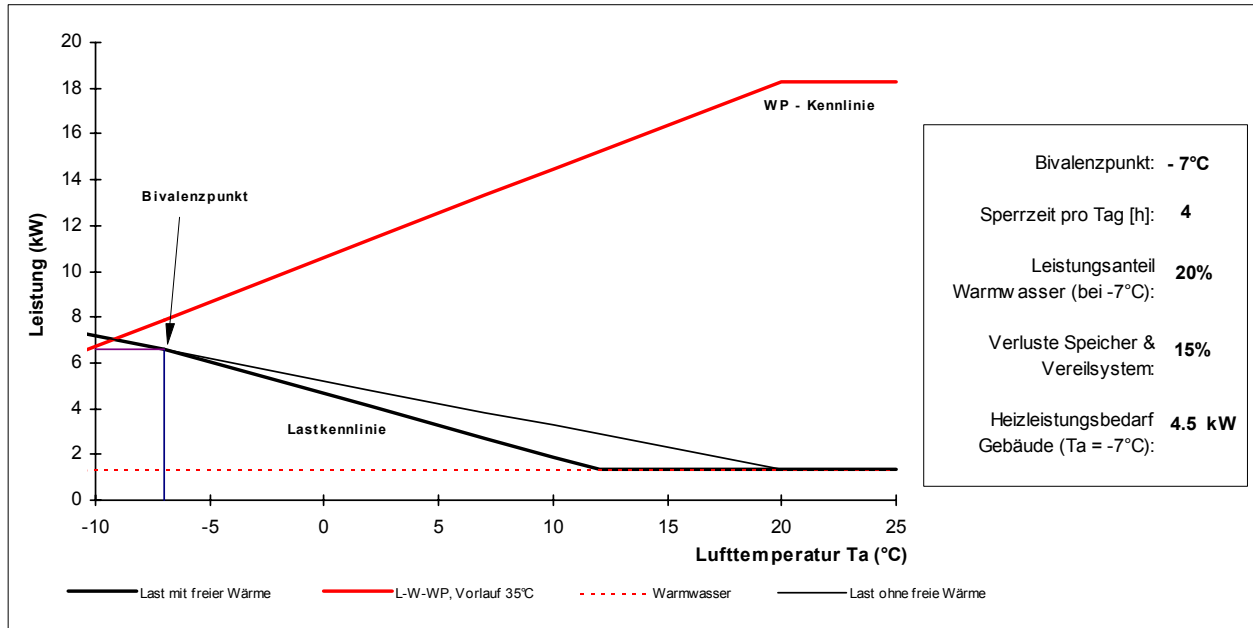


Abbildung 4-2: monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Auslegungstemperatur -7°C und pro Tag 4 h Sperrzeit

Noch verschärft wird diese Problematik durch die Sperrzeiten der Elektrizitätswerke. Im Wärmepumpentarif des EKZ (cf. Tabelle 4-1) kann das Elektrizitätswerk bis zu 6 Stunden pro Tag den Strom sperren. Ueblich sind 4 Stunden, nämlich von 11.00 - 13.00 Uhr und von 22.00 - 24.00 Uhr. Und da dies immer dann geschieht, wenn es am kältesten ist, muss unsere Wärmepumpe den Energiebedarf des Gebäudes in 20 statt in 24 Stunden pro Tag decken können. Mit der gleichen Wärmepumpe wie in Tabelle 4-1 kann somit nur noch ein Heizleistungsbedarf des Gebäudes von 4.5kW statt von 5.4 kW ohne Sperrzeiten gedeckt werden (cf. Abbildung 4-2).

EKZ-Wärmepumpen-Tarif ab Okt. 95	Hochtarif (HT)	Niedertarif (NT)
Oktober - März	7.00 - 22.00 Uhr	22.00 - 7.00 Uhr
April - September	7.00 - 17.00 Uhr	17.00 - 7.00 Uhr
Stromkosten	16.6 Rp./kWh	10.8 Rp./kWh
max. Sperrdauer	2 x 2h/Tag	1 x 2h/Tag
übliche Sperrzeit	11 - 13 Uhr	22 - 24 Uhr

Tabelle 4-1: Wärmepumpentarif EKZ mit Sperrzeiten für Neuanlagen

Im Vergleich dazu präsentiert sich die Wärmepumpenkennlinie einer Erdwärmesonden-Anlage wie in Abbildung 4-3. Die Kennlinie ist im wesentlichen unabhängig von der Aussentemperatur. Einzig bei zu klein dimensionierten Sonden sinkt die Entzugsleistung aus dem Erdreich bei andauerndem Wärmeentzug (d.h. bei tiefen Aussentemperaturen) leicht ab. Ausserdem sinkt die Entzugsleistung auch im Jahreszeitenverlauf (unabhängig von der Aussentemperatur) gegen den Frühling hin. Alle diese Effekte sind bei einer richtig dimensionierten Erdwärmesonde aber unbedeutend im Vergleich zur Wärmepumpenkennlinie der monovalenten Luft-Wasser-Wärmepumpe. Somit ist auch klar, warum bis anhin vielfach von monovalenten Luft-Wasser-Wärmepumpen abgeraten wurde.

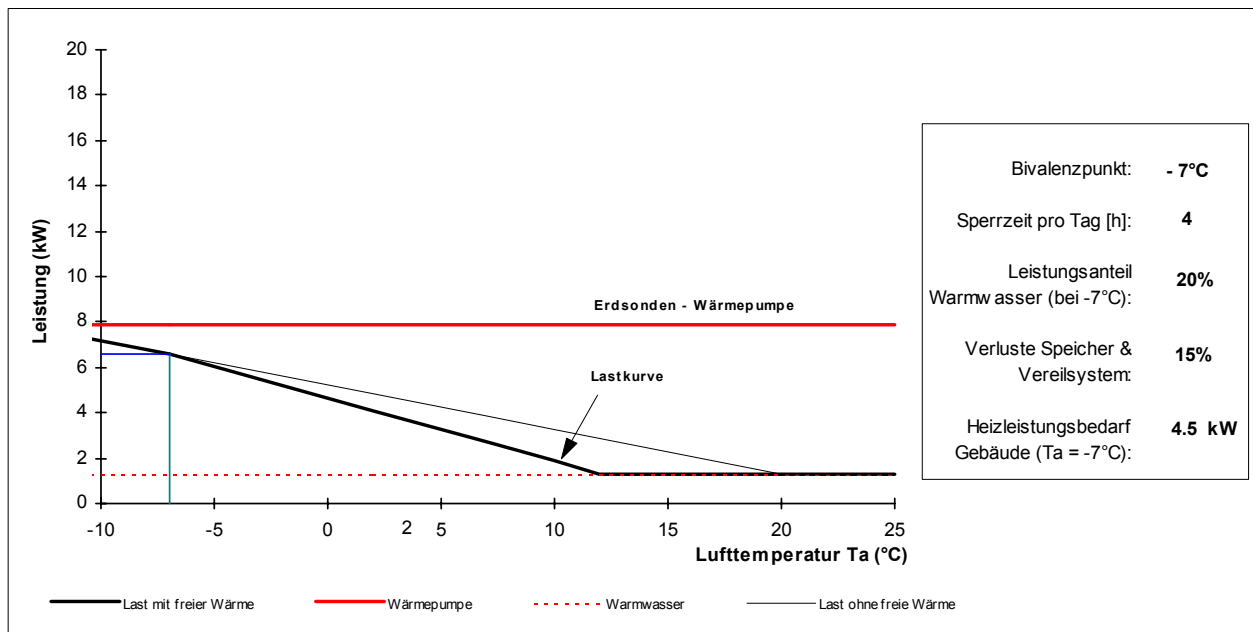


Abbildung 4-3: monovalente Sole-Wasser-Wärmepumpe (Erdwärmesonde). Auslegung -7°C , 4h Sperrzeit pro Tag.

Was ändert sich nun, wenn zur Luftvorwärmung ein Luft-Erdregister eingesetzt wird? Auch dies kann in unserem Lastdiagramm dargestellt werden. Unter der Annahme, dass unser (relativ gross dimensioniertes) Erdregister bei der Auslegungstemperatur von -7°C eine Austrittstemperatur von $+2^{\circ}\text{C}$ liefert und eine Erwärmung der Zuluft bei Temperaturen von unter 5°C immer möglich ist, lässt sich die neue Wärmepumpenkennlinie (inklusive Erdregister) wie in Abbildung 4-4 dargestellt grafisch ermitteln (fette gestrichelte Linie). Damit wird die Kennlinie unter 5°C Lufttemperatur flacher. Es kann somit für die gleiche Lastkennlinie eine kleinere Wärmepumpe (fein gestrichelte Linie) eingesetzt werden. Im Teillastbetrieb führt dies zu längeren Laufzeiten.

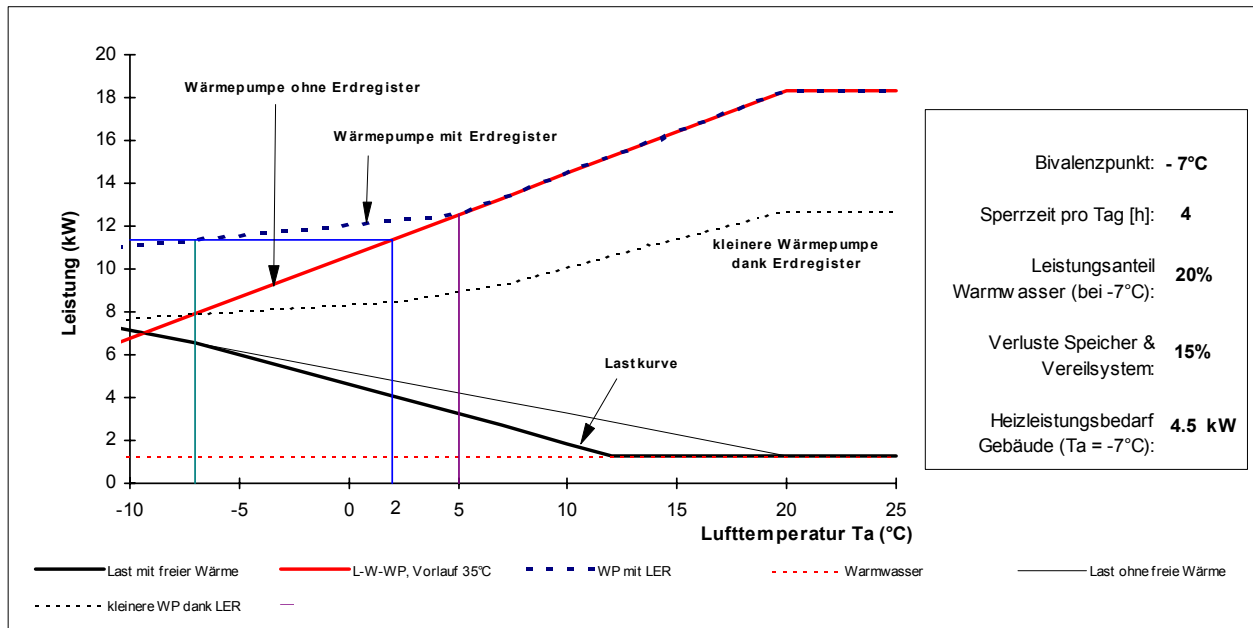


Abbildung 4-4: monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Luftvorwärmung in einem Erdregister

Soweit die Theorie. Wie sieht die Kennlinie nun für handelsübliche, im Testzentrum Töss geprüfte Wärmepumpen aus? In Abbildung 4-6 ist die Kennlinien einer guten Wärmepumpe als Beispiel im Lastdiagramm aufgetragen. Gut sichtbar ist der Knick in der Kurve, der den typischen Abtauverlusten bei Lufttemperaturen knapp über dem Gefrierpunkt entspricht.

Als Entscheidungsgrundlage für die Güte der Wärmepumpe muss selbstverständlich auch noch der zur Erreichung dieser Werte nötige elektrische Strombedarf und damit die Leistungsziffer in die Betrachtung miteinbezogen werden.

Die Werte unter -7°C und über 20°C sind extrapoliert und haben somit keine Aussagekraft.

Schön sichtbar ist bei diesem Fabrikat der Einbruch der Leistung bei Temperaturen von 2°C . Dies ist durch die relativ hohe Luftfeuchtigkeit in diesem Betriebspunkt und die damit verbundenen, grossen Abtauverluste am Verdampfer zu erklären. Da die 2°C Lufttemperatur am Erdregister-Austritt bei Auslegungsbedingungen wesentlich weniger feucht sind und es somit auch wesentlich seltener zur Abtauung im Verdampfer kommt, ist die effektive Leistungsabgabe etwas grösser als dargestellt. Das h-x-Diagramm in Abbildung 4-5 zeigt die Erwärmung im Erdregister von -7°C und 90% Feuchtigkeit auf 2°C . Da die Luft in einem Erdregister aus PVC oder PE keine Feuchtigkeit aufnehmen kann, sinkt damit die relative Feuchte auf 46%. Dieser niedrigere Feuchtigkeitsgehalt führt seltener zu Abtauungen und damit zu höheren Heizleistungen als die Tösswerte vermuten liessen.

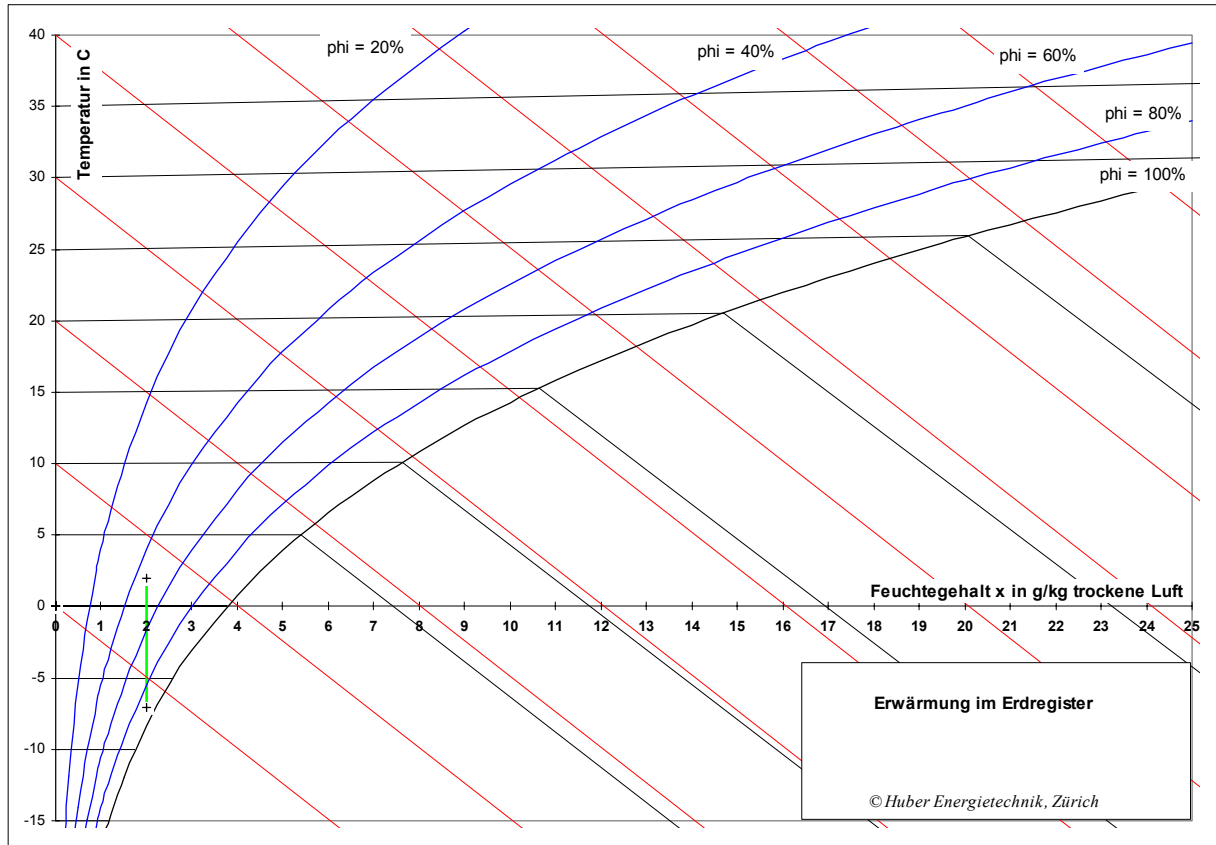


Abbildung 4-5: Bei einer Erwärmung im Erdregister von -7°C auf 2°C sinkt die relative Feuchtigkeit unter 50%

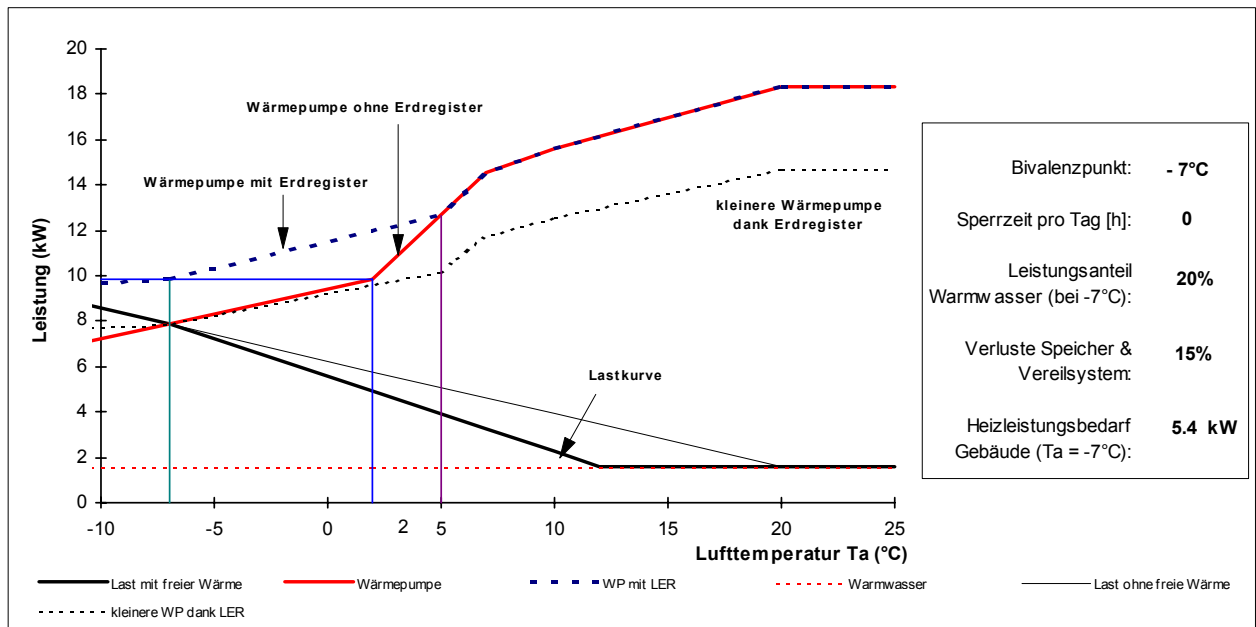


Abbildung 4-6: Kennlinie einer guten, im Wärmepumpen-Testzentrum Töss geprüften Wärmepumpe ohne Sperrzeiten.

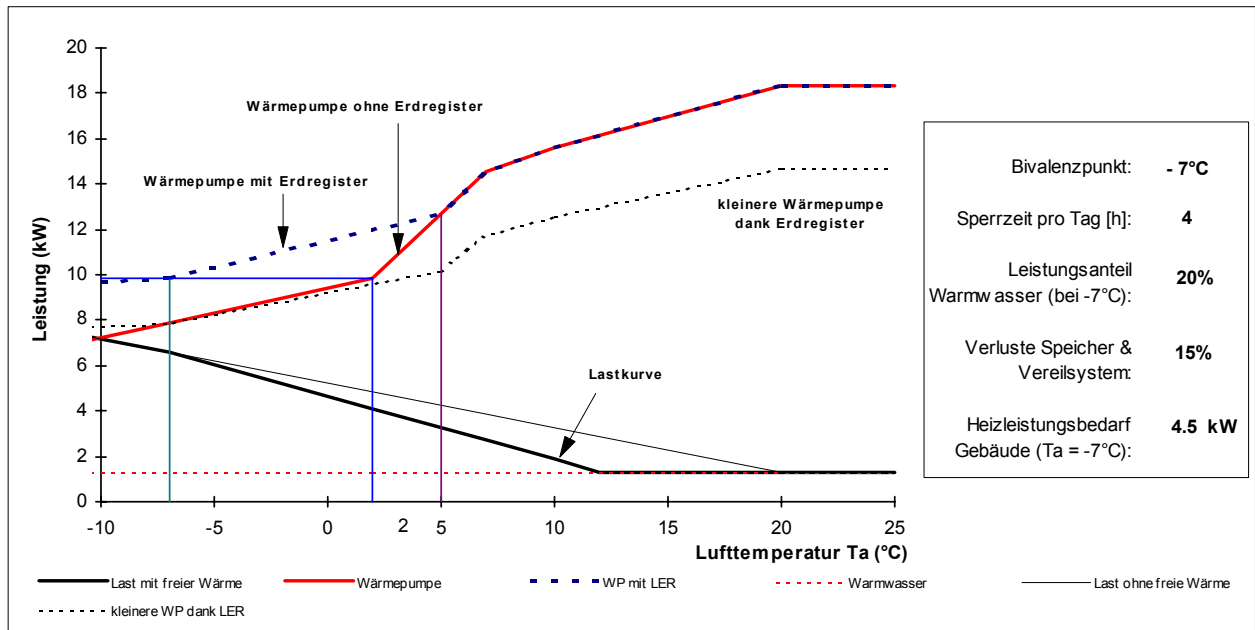


Abbildung 4-7: Kennlinie der Wärmepumpe aus Abbildung 4-6 mit Sperrzeiten.

Um die monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe trotz der oben beschriebenen Nachteile sinnvoll einsetzen zu können sind seit kurzem drehzahlgeregelte Wärmepumpen erhältlich. Damit lässt sich in einem begrenzten Leistungsbereich die Wärmeleistung der Wärmepumpe der Last angleichen. Ist allerdings die minimale Drehzahl der Wärmepumpe erreicht, so erfolgt auch hier die Lastanpassung durch Takten. Bei den heute erhältlichen, drehzahlgeregelten Wärmepumpen ist dies bei ca. 2°C (cf. Abbildung 4-8 / Abbildung 4-9). Ist die Wärmepumpe allerdings zu gross dimensioniert, so beginnt die Wärmepumpe bereits bei kälteren Temperaturen zu takten. Ein Pufferspeicher ist mit solchen Anlagen in der Regel also noch nötig.

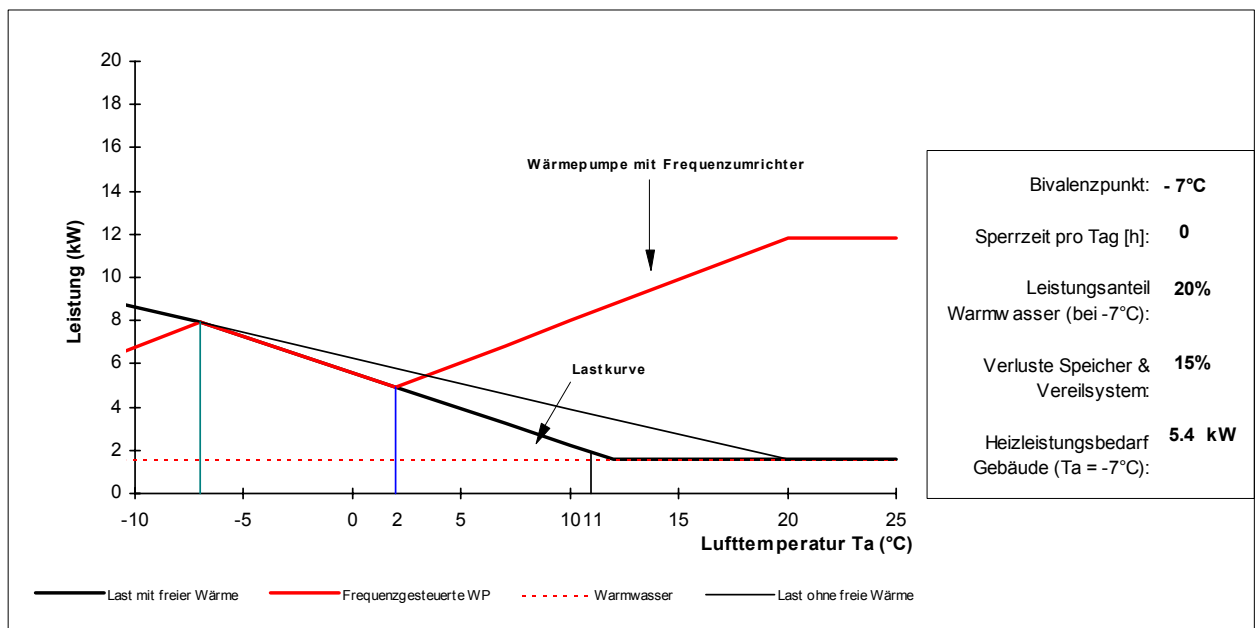


Abbildung 4-8: Kennlinie einer richtig dimensionierten, drehzahlgeregelten Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne Sperrzeit.

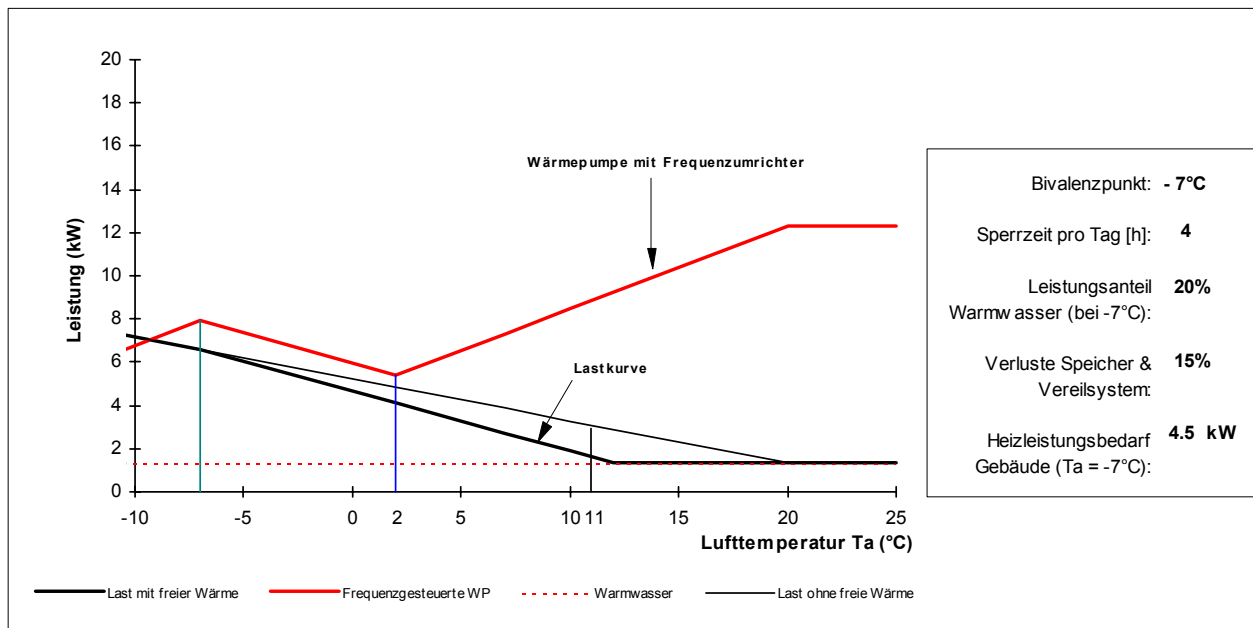


Abbildung 4-9: Kennlinie einer richtig dimensionierten, drehzahlgeregelten Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Sperrzeit.

Ein heute meist noch ungelöstes Problem ist die Regelung dieser Anlagen. Die meisten heute erhältlichen Anlagen sind nicht leistungsgeregt, sondern nach der Aussentemperatur gesteuert. Bei dieser Regelungsart takteten drehzahlgeregelte Wärmepumpen unnötigerweise im ganzen Leistungsspektrum, da die Störgrößen „Sonnenstrahlung“ und „interne Lasten“ nicht mitberücksichtigt werden. Da dieses Problem aber bereits mit heutiger Technik zu lösen wäre, soll nicht weiter auf dieses Thema eingegangen werden.

Die heute erhältlichen, drehzahlgesteuerten Wärmepumpen können wir noch nicht in unserem Lastdiagramm darstellen, da die entsprechenden Kennwerte nicht erhältlich sind. Nötig wären dazu die Leistungskennlinien der Wärmepumpe bei minimaler und bei maximaler Drehzahl. Werte dazwischen interessieren den Planer weniger. Trotzdem werden im Testzentrum Töss völlig beliebige Drehzahlen gemessen, ohne eine klar ersichtliche Strategie dahinter.

Welchen Einfluss hat nun ein Erdregister auf eine drehzahlgeregelte Wärmepumpe? Die Antwort auf diese Frage ist in Abbildung 4-10 ersichtlich. Der Bereich, in dem die Wärmeabgabe an die Last angepasst werden kann bleibt gleich. Da wir im Erdregister aber im Auslegungsfall bis zu 2°C erreichen, muss die Wärmepumpe nur auf diese Lufttemperatur ausgelegt sein. Der Bereich der Lastanpassung verschiebt sich dank einer kleineren Wärmepumpe somit im Diagramm parallel nach rechts. Es ist in unserem Beispiel somit möglich, dank dem Erdregister den ganzen Leistungsbereich bis zur Heizgrenze lastangepasst zu fahren. Der Pufferspeicher erübrigt sich somit.

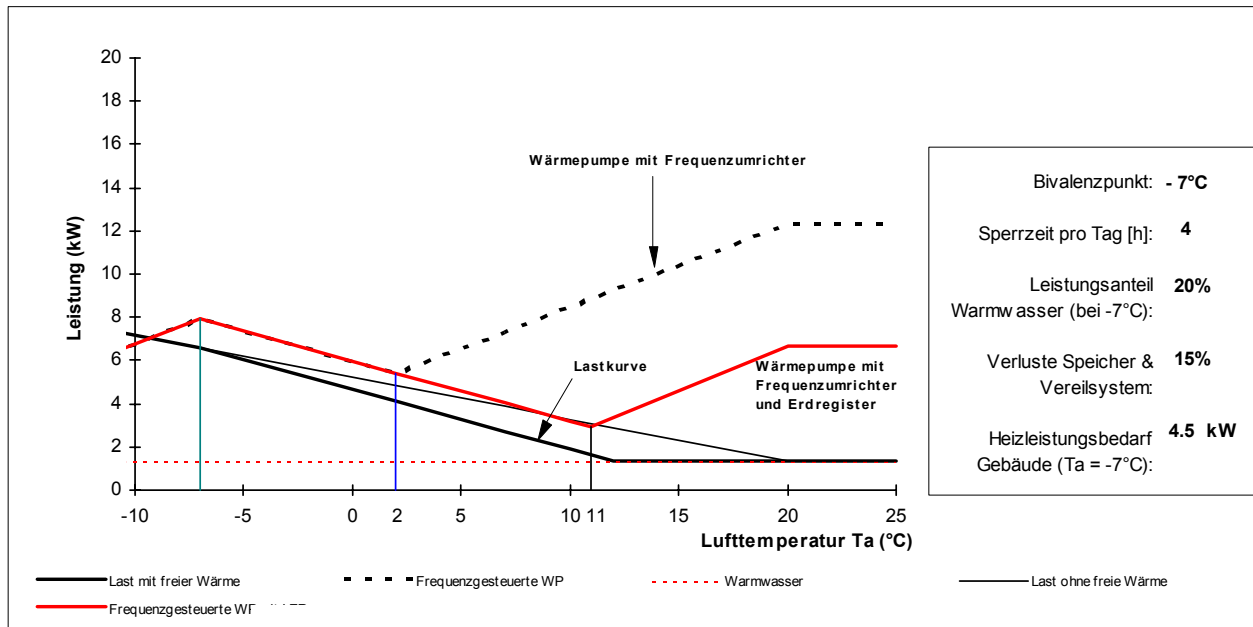


Abbildung 4-10: Kennlinie einer drehzahlgeregelten Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Erdregister

Eine weitere Möglichkeit der Lastanpassung sind die mehrstufigen Wärmepumpen. Bis anhin sind 2 solcher Maschinen im Testzentrum Töss geprüft worden. Da die Töss-Testergebnisse zu wenig Messpunkte aufweisen (nur ein Messpunkt bei der zweiten Stufe, keine Angaben über den Umschaltpunkt auf die 2. Stufe, keine Angabe über den Leistungssprung beim Umschalten von der 1. auf die 2. Stufe) kann auch daraus keine eindeutige Wärmepumpenkennlinie abgeleitet werden. Trotzdem wurde versucht, auf der Basis der vorhandenen Messdaten von Töss eine Kennlinie zu „interpolieren“, so dass das prinzipielle Verhalten dieser Maschinen sichtbar wird (cf. Abbildung 4-11). Das Teillastverhalten dieser Systeme ist etwas besser als bei den heute erhältlichen, drehzahlgeregelten Wärmepumpen (flachere Kennlinie im Teillastbereich).

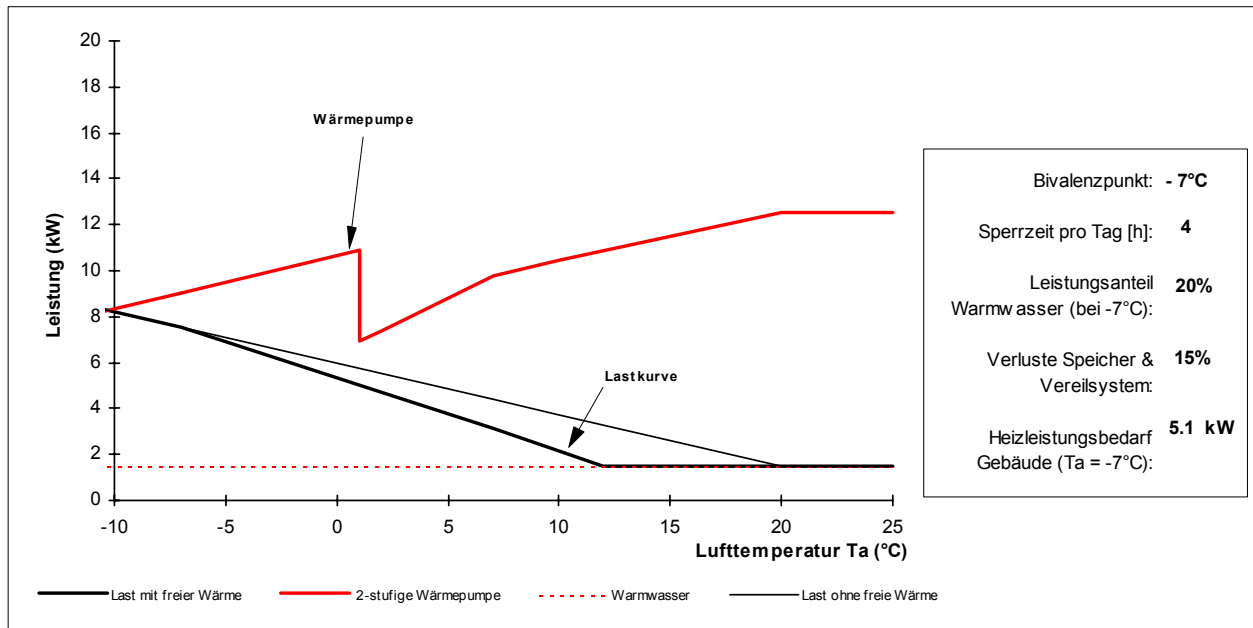


Abbildung 4-11: Kennlinie einer 2-stufigen Luft-Wasser-Wärmepumpe

Auch bei 2-stufigen Wärmepumpen lässt sich mit einem Erdregister der Schaltpunkt auf die 2. Stufe gegen höhere Aussenlufttemperaturen hin verschieben. Eine kleinere Dimensionierung der Wärmepumpe ist somit auch hier möglich (cf. Abbildung 4-12). Ausserdem wird bei kalten Temperaturen die Leistungskurve flacher. Wir nähern uns dank dem Erdregister und der 2-stufigen Wärmepumpe dem Verhalten von Erdsonden-Anlagen an (flache Leistungskennlinie). Im Teillastbereich kommt es aber (genau gleich wie bei Erdsonden-Anlagen) zum Takten. Pufferspeicher sind also bei dieser Anlagenart weiterhin sinnvoll.

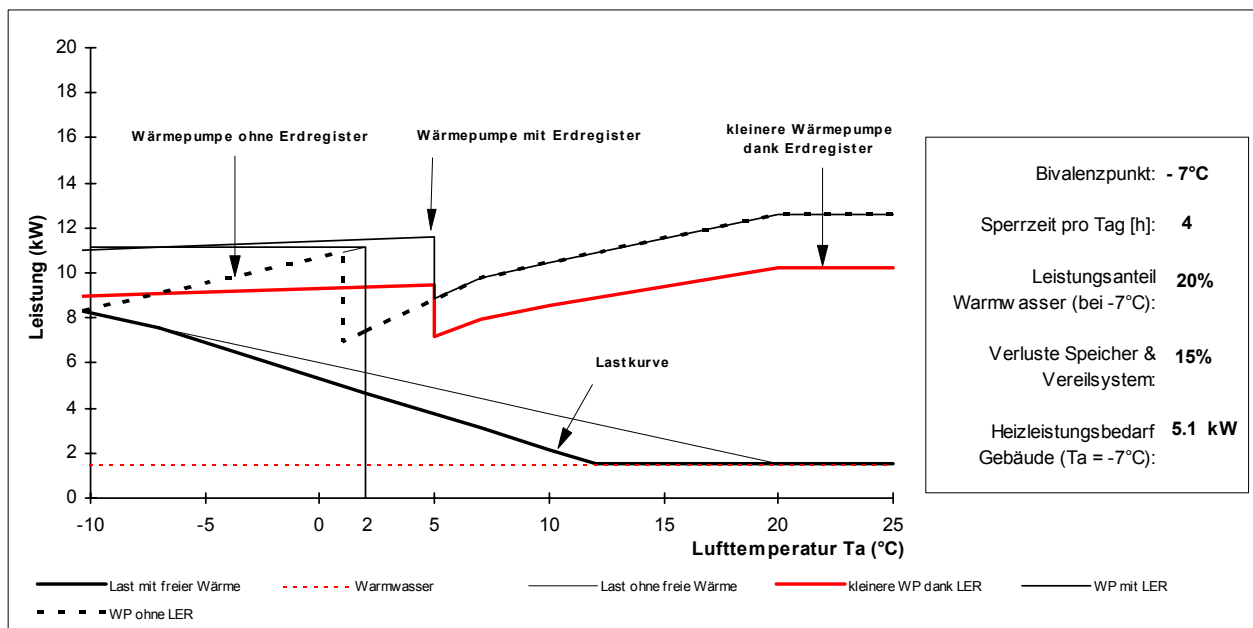


Abbildung 4-12: Kennlinie einer drehzahlgeregelten Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Erdregister

4.3 Erdregister - Modelle

4.3.1 Analytisches Erdregistermodell

Unter Voraussetzung von gewissen Annahmen und Vereinfachungen kann der Temperaturverlauf in einem Lufterdregister analytisch berechnet werden. In der folgenden Skizze sehen wir eine Übersicht der Situation.

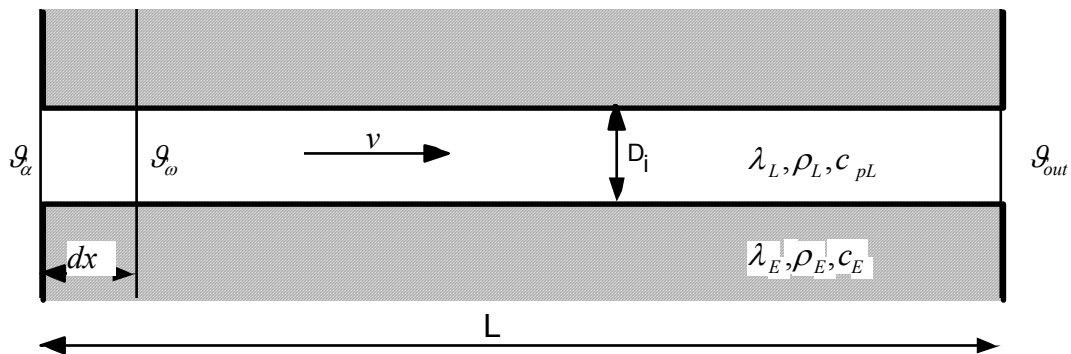


Abbildung 4-13: Bezeichnungen im Erdregister

Es handelt sich dabei um eine im Erdreich verlegte Röhre mit dem Innendurchmesser D_i . Für das Rohrmaterial werden die selben Materialeigenschaften wie für das Erdreich angenommen. Aus dem Durchmesser ergeben sich Umfang und Querschnittsfläche:

$$U = \pi \cdot D_i \quad (4-1)$$

$$F = \frac{\pi}{4} D_i^2 \quad (4-2)$$

Annahmen

- Alle Temperaturverläufe sind sinusförmig.
- Die Eindringtiefe ist unendlich, d.h. es gibt keine gegenseitige Beeinflussung von nebeneinander liegenden Rohren.

Die Materialeigenschaften haben typischerweise die folgenden Werte:

$$\lambda_E = 2.0 \frac{W}{mK}$$

$$\rho_E = 2000 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_E = 1000 \frac{J}{kgK}$$

$$\lambda_L = 0.025 \frac{W}{mK}$$

$$\rho_L = 1.2 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_{pL} = 1000 \frac{J}{kgK}$$

$$\mu_L = 1.8 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{mS}$$

Die Temperaturleitfähigkeit ist definiert als:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4-3)$$

Vereinfachungen

Für das Erdreich werden homogene und konstante Eigenschaften angenommen.

Um eine analytische Berechnung zu ermöglichen, wird die rotationssymmetrische Geometrie in eine ebene Geometrie abgewickelt:

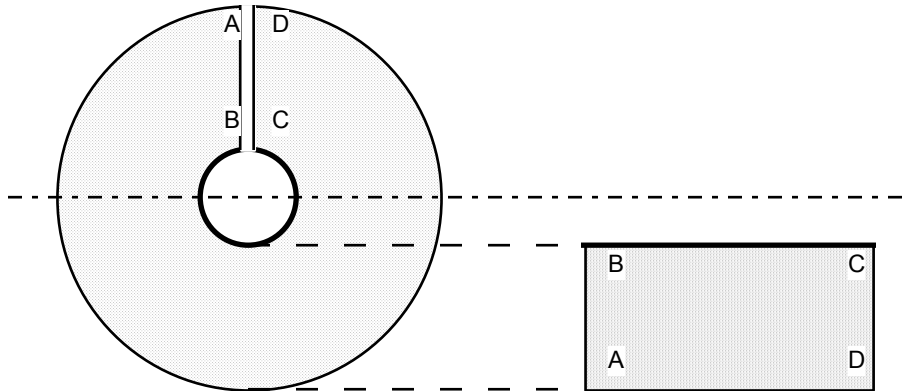


Abbildung 4-14: Abwicklung der Speichermasse „Erde“ am Erdregister-Rohr

Es entsteht dabei natürlich ein Fehler, da die Abwicklung der Strecke A-D in Wirklichkeit viel länger ist als B-C. Wir rechnen hier mit der richtigen Länge B-C (d.h. A-D wird gestaucht), welche aber durch einen Korrekturfaktor etwas gestreckt werden kann.

Schreibkonvention

Um eine bessere Lesbarkeit zu gewährleisten wird folgende Schreibkonvention angewendet:

$$A \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi\right) \equiv \sim [A, \varphi] \quad (4-4)$$

Das heisst, alle Sinusschwingungen mit der jeweiligen Periode T werden durch ihre Amplitude und ihre Phasenverschiebung charakterisiert.

Berechnung

Die Lufttrittstemperatur ϑ_α hat einen sinusförmigen Verlauf mit der Amplitude A_{i1} . Wir definieren diesen Temperaturverlauf als Grundschwingung und beziehen alle weiteren Temperaturverläufe auf ϑ_α . Damit ist

$$\vartheta_\alpha \equiv \sim [1, 0]$$

Durch die vorbeiströmende Luft entsteht im ersten Rohrabschnitt dx ein Wärmeaustausch zwischen der Luft und der Wandfläche. Gemäss dem VDI Wärmeatlas beträgt die Biot-Zahl (Verhältnis der inneren Wärmeleitwiderstandes (R/λ) zum äusseren Wärmeübergangswiderstand ($1/\alpha$)) für einen halbumendlichen Körper

$$Bi_M \equiv \frac{\alpha_a}{\lambda_E} \sqrt{\frac{a_E T}{\pi}} \quad (4-5)$$

Dabei berechnet sich der Wärmeübergangskoeffizient α über die Nusseltzahl Nu nach folgender Näherungsformel für turbulente Strömung in Rohren (Merker 1987):

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_L} = 0.021 \sqrt{\text{Pr}} \text{Re}_D^{0.8} \quad (4-6)$$

$$\text{Re}_D = \frac{v \cdot \rho \cdot D_i}{\mu_L} \quad (4-7)$$

$$\text{Pr}_L = 0.7 \quad (4-8)$$

Dies ergibt mit den vorgegebenen Materialkonstanten schliesslich folgende Formel für den Wärmeübergangskoeffizienten α :

$$\alpha = 3.25 \cdot v^{0.8} \cdot D_i^{-0.2} \quad (4-9)$$

Für die Temperaturamplitude und Phasenverschiebung an der Wandoberfläche im Abschnitt dx ergeben sich folgende Werte:

$$A_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 2/Bi_M + 2/Bi_M^2}} \quad (4-10)$$

$$\varphi_1 = -\arctan \frac{1}{1 + Bi_M} \quad (4-11)$$

In unserer Schreibkonvention also:

$$\mathcal{G}_w = \sim [A_1, \varphi_1] \quad (4-12)$$

Nun lässt sich durch Gleichsetzen des Wärmestromes an die Wand mit der Abkühlung/Erwärmung auf der Strecke dx der Temperaturverlauf \mathcal{G}_w am Austritt von dx bestimmen (ohne Berücksichtigung der Verweilzeit im Rohr):

$$\dot{q} = \alpha U (\mathcal{G}_\alpha - \mathcal{G}_w) dx = F v \rho_L c_{pL} (\mathcal{G}_\alpha - \mathcal{G}_w) \quad (4-13)$$

Nach \mathcal{G}_w aufgelöst:

$$\mathcal{G}_w = \mathcal{G}_\alpha - \frac{\alpha U dx}{F v \rho_L c_{pL}} (\mathcal{G}_\alpha - \mathcal{G}_w) \quad (4-14)$$

Bestimmen wir zuerst $\mathcal{G}_\alpha - \mathcal{G}_w$. Nach Voraussetzung sind alle Temperaturverläufe sinusförmig. Für die Subtraktion zweier Sinusfunktionen finden wir folgende Formeln:

$$(\mathcal{G}_\alpha - \mathcal{G}_w) = \sim [A_2, \varphi_2] \quad (4-15)$$

mit

$$A_2 = \sqrt{(1 - A_1 \cos \varphi_1)^2 + A_1^2 \sin^2 \varphi_1} \quad (4-16)$$

und

$$\varphi_2 = \arctan \frac{A_1 \sin \varphi_1}{A_1 \cos \varphi_1 - 1} \quad (4-17)$$

Wir berechnen nun noch A_3 gemäss

$$A_3 = \frac{\alpha U \cdot \text{corr} dx}{F v \rho_L c_{pL}} A_2 \quad (4-18)$$

Der Korrekturfaktor *corr* erhöht die am Wärmeaustausch beteiligte Umfangsfläche des Registerrohres und kompensiert somit zum Teil die "Stauchung" des Erdreiches in grösserer Entfernung des Rohres. Wir erhalten schliesslich

$$\mathcal{G}_w = \sim [A_4, \varphi_4] \quad (4-19)$$

mit

$$A_4 = \sqrt{(1 - A_3 \cos \varphi_3)^2 + A_3^2 \sin^2 \varphi_3} \quad (4-20)$$

und

$$\varphi_4 = \arctan \frac{A_3 \sin \varphi_3}{A_3 \cos \varphi_3 - 1} - \varphi_{vz} \quad (4-21)$$

Dabei berücksichtigt φ_{vz} die Phasenverschiebung, die durch die Verweilzeit der Luft im Abschnitt dx entsteht:

$$\varphi_{vz} = \frac{2 \pi}{v \cdot T} dx \quad (4-22)$$

Wenn wir uns das Lufterdregister aus vielen einzelnen Schichten der Dicke dx zusammengesetzt vorstellen, können wir jeweils den Temperaturverlauf am Ausgang des einen Elements als Eingangstemperaturverlauf des nächsten Elements verwenden. Dabei multiplizieren sich die Amplitudendämpfungen von Element zu Element, während sich die Phasenverschiebungen addieren. Wir erhalten für den Austrittstemperaturverlauf:

$$\mathcal{G}_{out} = \sim [A_5, \varphi_5] \quad (4-23)$$

mit

$$A_5 = A_4^{U dx} \quad (4-24)$$

$$\varphi_5 = \varphi_4 \cdot \frac{L}{dx} \quad (4-25)$$

Übertragungsfunktion

Wenn wir nun den Austrittstemperaturverlauf, bzw. Austrittsamplitude und Phasenverschiebung über die Periodendauer (bzw. die Frequenz) des Eintrittstemperaturverlaufs auftragen, erhalten wir die Übertragungsfunktion des Erdregisters. Diese Übertragungsfunktion charakterisiert die dynamischen Eigenschaften des Erdregisters unter den gemachten Voraussetzungen.

Energiegewinn

Wenn wir davon ausgehen, dass wir jederzeit einen Bedarf nach Wärmeenergie haben, so ziehen wir immer dann einen Gewinn aus dem Erdregister wenn die Austrittstemperatur ϑ_{out} höher ist als die Eintrittstemperatur ϑ_{α} .

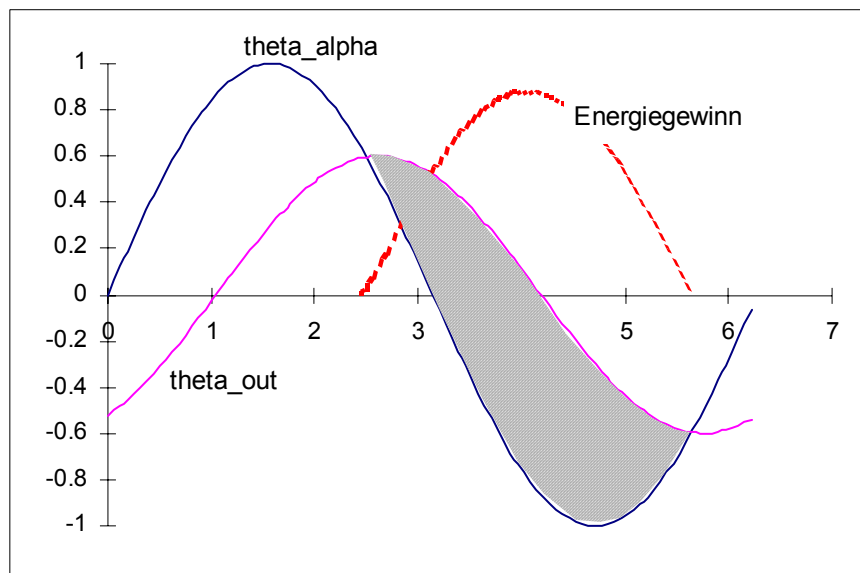


Abbildung 4-15: "Energiegewinn" als Resultat von Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung

Als Indikator für diesen Energiegewinn kann die Amplitude der Sinuskurve verwendet werden, die entsteht, wenn man die Eintrittstemperatur ϑ_{α} von der Austrittstemperatur ϑ_{out} subtrahiert:

$$A_6 = \sqrt{(1 - A_5 \cos \varphi_5)^2 + A_5^2 \sin^2 \varphi_5} \quad (4-26)$$

4.3.2 Analytisches Modell für die passive Regeneration eines Erdregisters

Als Kennwert für die passive Regeneration kann der Wärmetauscher-Kennwert NTU herangezogen werden:

$$NTU = \frac{\lambda_E S}{\dot{m}_L c_{pL}} L \quad (4-27)$$

Die NTU sind ein Mass für die passive Regenerationsfähigkeit eines Erdregisters. Die aus dem ständig (stationär) nachfliessenden Wärmefluss resultierende Erdregister-Austrittstemperatur kann daraus wie folgt berechnet werden:

$$\vartheta_{out} = \vartheta_m - [\vartheta_m - \vartheta_{in}] \varepsilon \quad (4-28)$$

mit dem Austauschgrad

$$\varepsilon = e^{-NTU} \quad (4-29)$$

Die Mitteltemperatur ϑ_m berechnet sich nach Ghazi et al. (1992) mit:

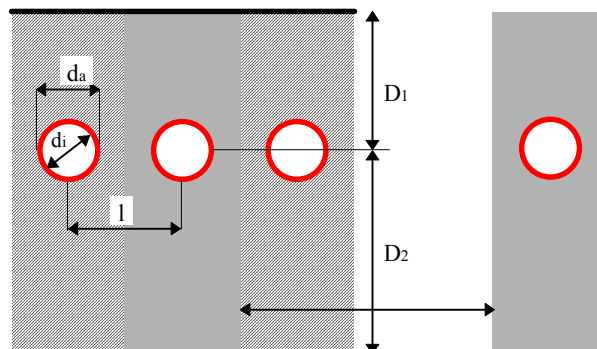


Abbildung 4-16: Bezeichnungen am einreihigen Erdregister

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_0 x_0 + \vartheta_E x_E}{x_0 + x_E} \quad (4-30)$$

$$x_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha_a} + \frac{D_1}{\lambda_E}} \quad (4-31)$$

$$x_E = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{D_2}{\lambda_E}} \quad (4-32)$$

Bei S handelt es sich um den bezogenen Formfaktor, der nach Grigull/Sander mit genügender Genauigkeit folgendermassen berechnet werden kann:

$$S = \frac{2\pi}{\cosh^{-1}\left(\frac{2D_1}{d_i}\right)} \quad (4-33)$$

4.3.3 Modell zur numerischen Simulation eines Erdregisters (WKM-Modell)

Die eindimensionale Fourierrechnung mit der Temperatur ϑ lautet:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x \partial x} \quad \text{wobei } \vartheta = \vartheta(t, x) \quad \text{und} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (4-34)$$

Als implizite Differenzengleichung kann sie geschrieben werden als:

$$\begin{aligned} \vartheta_{k+1,j} - \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (\vartheta_{k+1,j-1} - \vartheta_{k+1,j}) - \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (\vartheta_{k+1,j+1} - \vartheta_{k+1,j}) = \\ \vartheta_{k,j} + \frac{dt}{2} \frac{L_j}{C_j} (\vartheta_{k,j-1} - \vartheta_{k,j}) + \frac{dt}{2} \frac{L_{j+1}}{C_j} (\vartheta_{k,j+1} - \vartheta_{k,j}) \end{aligned} \quad (4-35)$$

Der Index k beschreibt die Zeitkoordinate, und der Index j die radiale Ortskoordinate. C ist die thermische Kapazität des Rechenknotens und L die thermische Leitfähigkeit zwischen zwei Rechenknoten. Der thermische Widerstand R ist der Kehrwert der thermischen Leitfähigkeit L :

$$L = \frac{1}{R} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T} \quad (4-36)$$

Die thermischen Widerstände lassen sich wie in der Elektrotechnik addieren.

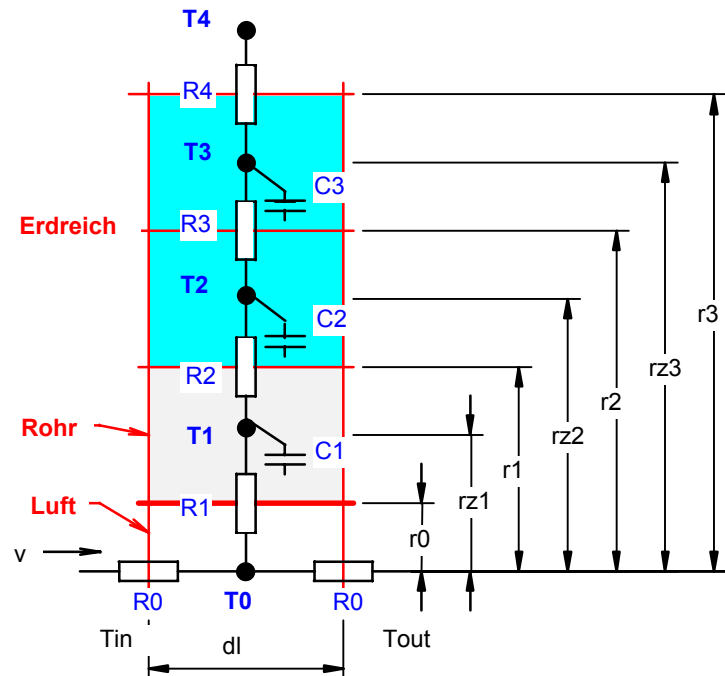


Abbildung 4-17 Konvention der Bezeichnungen am Element dl

Dabei sind die „Kapazitäten“ C und die „thermischen Widerstände“ R am Beispiel mit 3 Rechenknoten wie folgt zu berechnen:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= c_R \rho_R \pi (r_1^2 - r_0^2) dl \\
 C_2 &= c_E \rho_E \pi (r_2^2 - r_1^2) dl \\
 C_3 &= c_E \rho_E \pi (r_3^2 - r_2^2) dl
 \end{aligned}
 \tag{4-37}$$

Diskretisierung der thermischen Widerstände am Beispiel mit 3 Rechenknoten:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{1}{2 \pi \alpha r_0 dl} + \frac{1}{2 \pi \lambda_R dl} \ln \frac{rz_1}{r_0} \\
 R_2 &= \frac{1}{2 \pi dl} \left(\frac{1}{\lambda_R} \ln \frac{r_1}{rz_1} + \frac{1}{\lambda_E} \ln \frac{rz_2}{r_1} \right) \\
 R_3 &= \frac{1}{2 \pi dl} \frac{1}{\lambda_E} \ln \frac{rz_3}{rz_2} \\
 R_4 &= R_3 \text{ oder an Oberfläche} \\
 R_4 &= \frac{1}{2 \pi \lambda_E dl} \ln \frac{r_3}{rz_3} + \frac{1}{2 \pi \alpha_a r_3 dl}
 \end{aligned}
 \tag{4-38}$$

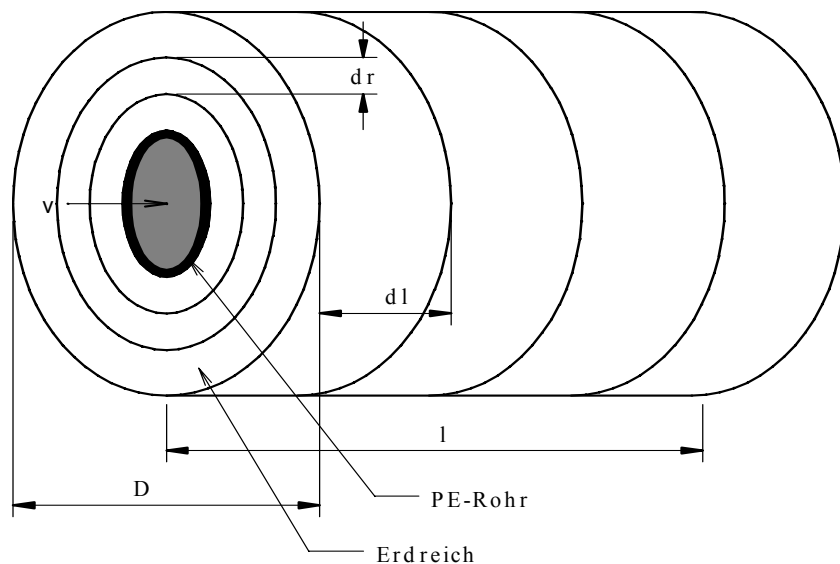


Abbildung 4-18: Berechnung mit finiten-Differenzen

Rechengitter

Das Rechengitter in radialer Richtung ist variabel. Es wird durch den Gitterfaktor f definiert:

$$\text{Gitterfaktor } f = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}} \quad (4-39)$$

Ein Gitterfaktor von 2 verdoppelt jeweils die Radius-Differenz zwischen zwei Rechenvolumen. Die vorliegenden Berechnungen wurden mit einem Gitterfaktor von $f=2$ durchgeführt.

Bei Vorgabe des Simulationsgebietes mit dem grössten Rechenradius r_m kann das Gitter wie folgt berechnet werden, wobei m die Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung darstellt:

$r_0 = \text{Innendurchmesser der Erdregister - Rohre}$

$r_1 = \text{Aussendurchmesser der Erdregister - Rohre}$

$$\text{für } j \geq 2: \quad r_j = r_{j-1} + (r_m - r_1) \frac{1-f}{1-f^{m-1}} f^{j-2} \quad (4-40)$$

Lösungsalgorithmus

Die Grundgleichung kann man auch in Matrixform schreiben. Mit 3 Rechenknoten ist dies:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -dt L_1 & 2C_1 + dt L_1 + dt L_2 & -dt L_2 & 0 & 0 \\ 0 & -dt L_2 & 2C_2 + dt L_2 + dt L_3 & -dt L_3 & 0 \\ 0 & 0 & -dt L_3 & 2C_3 + dt L_3 + dt L_4 & -dt L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ dt L_1 & 2C_1 - dt L_1 - dt L_2 & dt L_2 & 0 & 0 \\ 0 & dt L_2 & 2C_2 - dt L_2 - dt L_3 & dt L_3 & 0 \\ 0 & 0 & dt L_3 & 2C_3 - dt L_3 - dt L_4 & dt L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_0 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix}^k \quad (4-41)$$

Die obige Matrix - Gleichung kann einfach durch invertieren der ersten Matrix auf eine Multiplikation einer Matrize mit dem Temperaturvektor zurückgeführt und gelöst werden. Dabei sind das erste und das letzte Element des Temperaturvektors die variablen Randbedingungen.

Axiale Kopplung

Das Erdregister-Rohr wird in axialer Richtung in n gleichmässige Teilsegmente der Länge dl aufgeteilt. In jedem Teilsegment wird radial die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung wie oben beschrieben gelöst. Gekoppelt sind die einzelnen Segmente in axialer Richtung nur über die Luft im Rohr, d.h. es wird keine Wärmeleitung im Erdreich in axialer Richtung modelliert. Der konvektive Wärmetransport im Rohr kann stationär mit einem „quasi“ thermischen Widerstand wie folgt aus der Luftströmungs-Geschwindigkeit v berechnet werden:

$$R_0 = \frac{1}{L_0} = \frac{1}{\pi r_0^2 v \rho_L c p_L} \quad (4-42)$$

Die Lufttemperatur im Rohrelement i berechnet sich aus der Energiebilanz für dieses Element im stationären Zustand mit

$$\vartheta_{i,0} = \frac{L_1}{L_1 + L_0} \vartheta_{i,1} + \frac{L_0}{L_1 + L_0} \vartheta_{i-1,0} \quad (4-43)$$

Randbedingungen

Für die ungestörte Temperatur im Erdreich in einer bestimmten Tiefe wird nach Sagelsdorff (1990) im nicht adiabaten Fall der folgende Ansatz gewählt:

$$\vartheta(x,t) = \vartheta_m + \vartheta_0 \cdot e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{aT}}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - x\sqrt{\frac{\pi}{aT}}\right) \quad (4-44)$$

Im adiabaten Fall wird der letzte Widerstand unendlich gesetzt, d.h. $L_n = 0$.

Auch bei den inneren Randbedingungen (beim Rohr) müssen zwei Fälle unterschieden werden:

1. Das Erdregister ist nicht in Betrieb.
2. Das Erdregister wird mit Luft durchströmt.

Im ersten Fall wird der Wärmeübergangskoeffizient α Null gesetzt, was einer adiabaten Randbedingung mit $L_1 = 0$ entspricht.

Im zweiten Fall wird nach Merker (1987) der Wärmeübergangskoeffizient aus der folgenden Beziehung berechnet:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda_L}{D} \quad (4-45)$$

mit
$$Nu = 0.021\sqrt{\text{Pr}} \text{Re}^{0.8} \quad (4-46)$$

Anfangsbedingungen

Am Anfang der Simulation wird im ganzen Simulationsbereich die Erdtemperatur nach (4-44) eingesetzt. Ausserdem werden in einer Jahressimulation vorgängig 3 Monate als Einschwingvorgang durchgerechnet, bevor mit der eigentlichen Simulation begonnen wird.

Meteodaten

Simuliert wird jeweils ein ganzes Jahr in Stundenschritten. Die Erdregister-Eintrittstemperaturen können entweder aus Messungen oder mit einem „Design Reference Year“ (DRY) der EMPA aus der Meteonorm 2.01 (Remund et al. 1995) eingelesen werden. Für die vorliegenden Berechnungen wurde die Wetterstation Zürich SMA als Basis genommen.

Stabilität

Die Methode von Crank-Nicholson ist zweiter Ordnung und bietet für unseren Anwendungsfall keine Stabilitätsprobleme. Als Zeitschritt kann 30 Minuten, bei 6 Rechenknoten gewählt werden. Eine Gitterverfeinerung von 14 Rechenknoten bei einem Zeitschritt von 2.4 Minuten brachte lediglich eine Abweichung von ca. 4%.

4.4 Gebäudemodell

4.4.1 Ausgangslage

Für die Bestimmung des Nutzens einer Wärmepumpenanlage mit Erdregisters genügt die Untersuchung der Anlage isoliert nicht. Der Nutzen muss in einem Gesamtsystem, d.h. WP-Anlage mit Erdregisters und Gebäude, ermittelt werden. Für die Berechnung des Heiz- oder Kühlbedarf, sowie allfällig anfallender Abwärme wird ein Gebäudemodell benötigt. Die verfügbaren Hilfsmittel verlangen, dass ein Gebäude sehr detailliert, mit einer grossen Zahl von Parametern für die Gebäudeeigenschaften und ebenso komplexer Beschreibung der Gebäudenutzung eingegeben wird. Die Uebertragbarkeit der Ergebnisse dieser Berechnungen auf ein anderes Gebäude ist nicht systematisch möglich.

Beim Projekt Luft-Erdregister verwenden wir daher für die Berechnung der Last ein Gebäudemodell erster Ordnung. Eine für unsere Bedürfnisse geeignete Form, inklusive der Berechnungsmethode für die Bestimmung der Parameter wurde durch Dr. Harald Burmeister und Prof. Bruno Keller (Institut für Hochbautechnik, ETH Hönnggerberg), unter dem Titel *'Gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata'* publiziert. Durch einige Ergänzungen konnte dieses Modell für unsere Zwecke angepasst werden.

Bei diesem Modell werden allgemein gültige Parameter für das Gebäude verwendet und deren Berechnung wird festgelegt. Auf diese Weise kann jedes Gebäude klassiert und in ein Schema eingeordnet werden. Die Darstellung der sog. Klimaflächen erlaubt eine einfache Beurteilung der Auswirkungen von Variationen an den thermischen Eigenschaften des Gebäudes. Die Wahl dieses Modellansatzes hilft für eine einfache Beurteilung der Uebertragbarkeit der Resultate.

4.4.2 Modell Burmeister/Keller

Im Rahmen seiner Dissertation befasste sich Harald Burmeister mit der Aufgabe, eine einfache Berechnungsmethode für die Ermittlung von Heiz- oder Kühlbedarf sowie den dafür benötigten Energiebedarf zu finden. Bei dieser Methode werden die klimatischen Verhältnisse und die bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes, wie Isolation und Wärmespeicherfähigkeit, berücksichtigt.

Zu diesem Zweck formulierte Burmeister ein Modell erster Ordnung für das thermische Verhalten eines Raumes.

$$g_i(t) = \tau * \frac{d g_i(t)}{dt} + (g_a(t) + \gamma * I(t)) \quad (4-47)$$

Er verwendete für sein Modell zwei Parameter des Gebäudes, nämlich

- die Zeitkonstante τ [h], als Mass für die Anpassung der Raumtemperatur an die Aussen-temperatur
- das Gewinn-zu-Verlust-Verhältnis γ [m² K/W] als Mass für die Strahlungsgewinne im Vergleich mit dem Wärmeaustausch mit der Umgebung

Für die Herleitung dieser Grössen sei auf Burmeister/Keller (1995) verwiesen.

Berechnung der Parameter

Eine Besonderheit bei diesem Ansatz ist, dass alle Grössen spezifisch bezüglich der Aussenoberfläche gerechnet werden.

Der **Wärmeverlust-Koeffizient K** beschreibt alle mit der Temperaturdifferenz innen–aussen verbundenen Wärmeverluste des Gebäudes: Transmission und Lüftung! Damit unterscheidet er sich von üblichen k-Werten. Diese Definition setzt voraus, dass die Lüftungsintensität konstant ist.

$$K = \frac{1}{A_{\text{aussen}}} * \left[\underbrace{\sum_{j \text{ über alle Aussenflächen}} A_j * k_j}_{\text{Transmission}} + \underbrace{\frac{n * V * (c * \rho)_{\text{Luft}}}{3600}}_{\text{Lüftung}} \right] \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (4-48)$$

A: Flächen [m²]
k: k-Werte [W/m² K]

V: Raumvolumen [m³]
n: Luftwechsel [h⁻¹]

Die **Zeitkonstante τ** ist von der inneren Wärmespeicherfähigkeit (Kapazität C) des Gebäudes und von den Wärmeverlusten, also von K abhängig.

$$C = c * \rho * d * \frac{A_{\text{innen}}}{A_{\text{aussen}}} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (4-49)$$

c: Wärmekapazität des Materials [J/kg K]
d: Dicke des Bauteils [m]
 ρ : Dichte des Materials [kg/m³]

Bei der Berechnung der Kapazität C wird bei dicken oder mit Isolationsschichten versehenen Bauteilen nur ein Teil der vorhandenen Masse berücksichtigt. Da bei den normalerweise im Gebäude zulässigen Temperaturschwankungen und der Periodizität nur ein Teil der Masse thermisch aktiviert wird.

$$\tau = \frac{C}{K} \quad [h] \quad (4-50)$$

Der Gewinn durch Sonneneinstrahlung ist von der Grösse und vom Gesamtenergietransmissionswert g der Fenster abhängig. Der Wert G wird ebenfalls auf die Summe der Aussenflächen des Gebäudes bezogen:

$$G = \frac{1}{A_{\text{aussen}}} * \sum_{j \text{ über alle Aussenflächen}} A_j * g_j \quad [-] \quad (4-51)$$

Durch Division von G durch K wird **γ als Gewinn zu Verlustverhältnis** berechnet.

$$\gamma = \frac{G}{K} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (4-52)$$

Der **Warmwasseranteil** ist eine zusätzliche Kenngrösse für den Energiebedarf eines Gebäudes. Eine bessere Wärmedämmung wirkt sich in einer Senkung des Wärmebedarfs aus. Damit steigt der Anteil des Energiebedarfs für Warmwasser. Bei einem Niedrigenergiehaus ist somit die Variation der Last im Jahresablauf wesentlich geringer. Dies soll bei der Dimensionierung der Wärmeerzeuger beachtet werden.

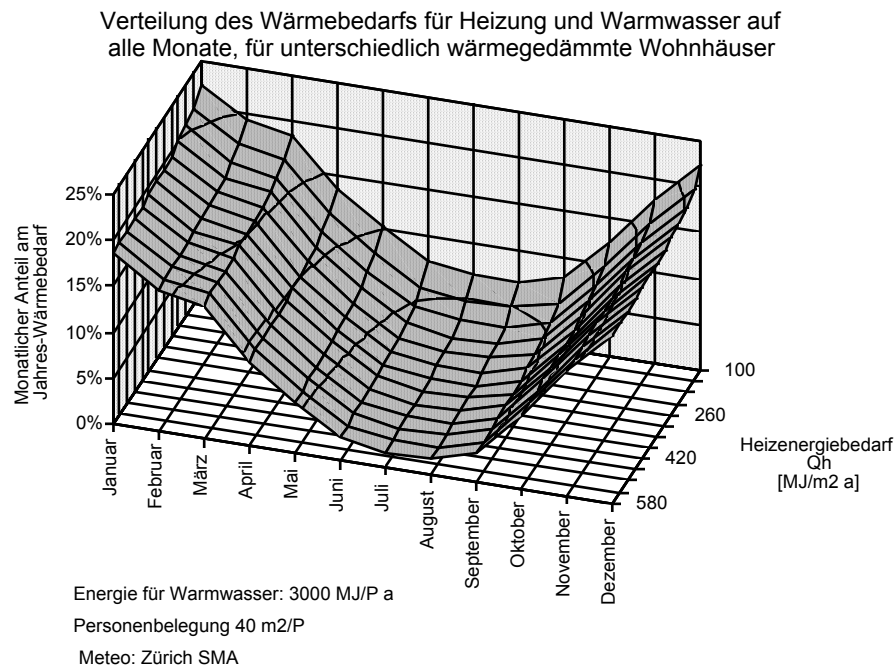


Abbildung 4-19 Bei einem Wohnhaus mit kleiner Energiekennzahl ist die saisonale Variation des Wärmebedarfs wesentlich geringer als bei einem schlecht wärmegeämmten Gebäude

Beim Niedrigenergiehaus beträgt der Wärmebedarf im Juli 29% des Januarbedarfs. Bei einer Energiekennzahl von 580 MJ/m²a hingegen nur 9%.

Gebäudekategorien

Die Parameter wurden für verschiedene Gebäudekategorien berechnet. Um die Spanne der Werte zu ermitteln wurden sowohl Varianten in Niedrigenergiebauweise als auch in konventioneller Bauweise untersucht. Ein Gebäude konventioneller Bauweise genügt gerade den aktuellen Wärmedämmvorschriften.

In Abbildung 4-20 sind die Wertebereiche der Zeitkonstanten τ und des Gewinn-Verlust-Verhältnisses γ für die verschiedenen Gebäudekategorien eingetragen. Die Linien zeigen den möglichen Wertebereich, bei unterschiedlicher Bauart an.

Die **Wohnbauten** in Niedrigenergiebauweise unterscheiden sich gegenüber der Standardbauten durch eine bessere Wärmedämmung und durch eine höhere Luftdichtigkeit. Die Abmessungen der Gebäude, insbesondere die Fensterflächen stimmen jeweils überein.

Die Variation innerhalb der Gruppe Einfamilienhaus (EFH) resp. Mehrfamilienhaus (MFH) liegt in der Isolation. Der Unterschied zwischen EFH und MFH liegt in der unterschiedlichen Form, wie Oberflächen-Volumen-Verhältnis und daher einer relativ grösseren Gebäudemasse

Die zwei Gruppen **Büro** 1 und 2 unterscheiden sich im Fensteranteil. Die Gruppe 2 ist mit einer Glasfassade ausgerüstet.

Hier sind die Gebäude der Niedrigenergie-Kategorie (im Gegensatz zu Standard) neben der besseren Wärmedämmung mit Wärmeschutzgläsern ausgerüstet und die Lüftungsanlage wird mit einem niedrigen Luftwechsel betrieben.

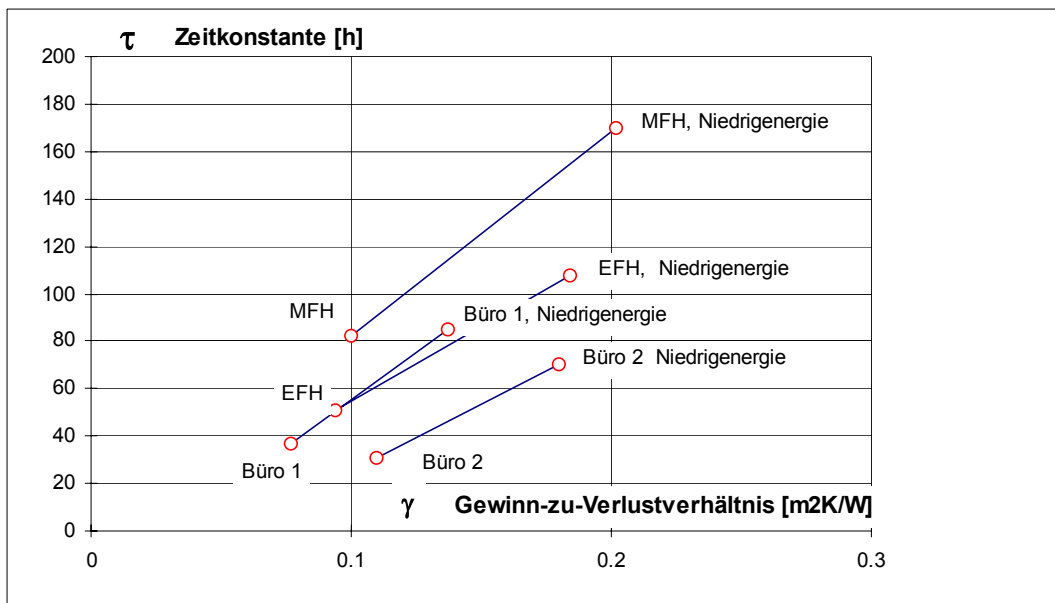


Abbildung 4-20 Wertebereich der Parameter für die Untersuchten Gebäude. Die Bereiche 'Wohnen' oder 'Büro' unterscheiden sich deutlich.

Mit den hier ermittelten Gebäudekenngrößen kann nun aus der entsprechenden Klimafäche der Heiz oder Kühlbedarf abgelesen werden. Für das Projekt LER wurde das Jahresprofil des Wärme- und Kältebedarfs jedoch pro Gebäude separat berechnet.

4.4.3 Berechnung des Heiz- und Kühlleistungsbedarfs

Für das Modell erster Ordnung gilt die Energie-Bilanzgleichung des Gebäudes:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = K * [\vartheta_a(t) - \vartheta_i(t)] + G * I(t) + P_{\text{int}}(t) + P_{\text{heiz / kühl}}(t) \quad (4-53)$$

mit

$$\frac{dQ(t)}{dt} = C * \frac{d\vartheta(t)}{dt} \quad (4-54)$$

Für das Ein-Knoten-Modell sind drei Parameter wichtig:

K beschreibt den von der Temperaturdifferenz aussen/innen ($\vartheta_a - \vartheta_i$) abhängigen Energieverlust. Dieser umfasst die Transmissions- und die Lüftungsverluste!

Mit G wird die Gesamtenergietransmission für hochfrequente Strahlung beschrieben

C ist die relevante Wärmekapazität.

Die internen Lasten sowie auch Heizung und Kühlung gehen direkt in die Energiebilanz ein. Bei einem Modell erster Ordnung kann nicht zwischen konvektiven und radiativen Lasten unterschieden werden. Bei der Interpretation der resultierenden Temperatur τ_i ist zu beachten, dass dies die Temperatur der Gebäudestruktur ist. Die Lufttemperatur im Gebäude kann nicht berechnet werden.

Die Umformung in eine inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung ergibt

$$\frac{d\vartheta_i(t)}{dt} = -\frac{K}{C} * \vartheta_i(t) + \frac{K}{C} * \vartheta_a(t) + \frac{G}{C} * I(t) + \frac{P_{\text{int}}(t) + P_{\text{heiz/kühl}}(t)}{C} \quad (4-55)$$

Berechnung eines Jahreslastprofils

Die Berechnung eines Jahreslastprofils erfolgt in Stundenschritten. Das heisst, für jede Stunde des Jahres wird die Knotentemperatur am Ende der Stunde angegeben und die dafür (während der letzten) Stunde benötigte Heiz- resp. Kühlleistung. Als Input (Störgrössen von aussen) werden Meteodaten aus der Meteonorm 2.01, ebenfalls in Stundenwerten benötigt.

Bei der Berechnung wird angenommen, dass sich die Randbedingungen im Verlaufe des Stundenschrittes nicht ändern. Die Differentialgleichung reduziert sich damit auf eine Inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Diese Differentialgleichung kann somit für den Stundenschritt $t = 1$ h gelöst und das Resultat explizit angegeben werden:

$$\vartheta_{i_{n+1}} = \varepsilon * \vartheta_{i_n} + (1 - \varepsilon) * \vartheta_{a_n} + (1 - \varepsilon) * \gamma * I_n + \frac{1 - \varepsilon}{K} * P_{i_n} + \frac{1 - \varepsilon}{K} * P_{hk_n} \quad (4-56)$$
$$\varepsilon = e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

Diese Gleichung kann auch nach der Heiz-/Kühlleistung aufgelöst werden. Dann erhalten wir als Resultat die Leistung, die notwendig ist um am Ende des Zeitintervalls eine bestimmte Temperatur zu erhalten:

$$P_{hk} = \frac{K}{1 - \varepsilon} \left(\vartheta_{i_{n+1, \text{soll}}} - \varepsilon * \vartheta_{i_n} \right) - K * \vartheta_{a_n} - K * \gamma * I_n - P_{i_n} \quad (4-57)$$

Variable Luftwechsel

Wenn die Variation der Luftmenge der Lüftungsanlage im Tagesablauf berücksichtigt werden soll, so ändert auch der Wärmeverlustkoeffizient K und damit die Gebäudekennwerte τ und γ . Dies ist jeweils zur vollen Stunde, das heisst bei Wechsel des Zeitintervalls möglich, ohne dass dadurch Probleme mit der Energiebilanz verursacht würden.

Diskussion

Interne Lasten werden solange nutzbar vollumfänglich genutzt, das Heizsystem reagiert ideal (verzögerungsfrei). In Realität dürfte die Verzögerung zu einer häufigeren Ueberwärmung der Räume und einem höheren Heizenergiebedarf führen.

Im Modell erster Ordnung repräsentiert die Knotentemperatur im wesentlichen die Strukturtemperatur des Gebäudes. Die vergleichsweise schnellen Temperaturschwankungen der Luft werden nicht mitgemacht. Ebenso wirken die internen Lasten direkt auf den Strukturknoten. Eine Unterscheidung zwischen konvektiver und radiativer Energieabgabe ist nicht möglich.

Da die Differentialgleichung für den Stundenschritt bereits gelöst ist, kann die 'Simulation' mit einem Tabellenkalkulationsprogramm gerechnet werden.

In unserer Anwendung konnte die Knotentemperatur in einem Intervall (20...26°C) frei, in Abhängigkeit der Gebäudeparameter, internen Lasten und der meteorologischen Daten variieren. Nur bei Unter- resp. Überschreitung der Temperaturgrenzen wird geheizt oder gekühlt. Die Tabellenkalkulation liefert somit ein von Gebäude und Meteo abhängiges Jahresprofil für die Gebäudetemperatur und den dazugehörenden Wärme- und Kältebedarf.

4.4.4 Berechnung der Schaltzyklen der Wärmepumpe

Wenn keine integrierte Simulation des Gesamtsystems Gebäude, mit Erdregister und Wärmepumpenanlage durchgeführt werden kann, müssen in Abhängigkeit des Wärmebedarfes, der Aussentemperatur und der erwarteten Leistung des Erdregisters die Betriebszeiten der Wärmepumpe ermittelt werden.

Erdregister

Bei diesen Berechnungen wird auf die Berücksichtigung der Dynamik von Wärmepumpe und Luft-Erdregister verzichtet, beide Komponenten werden nur mit einer Kennlinie beschrieben.

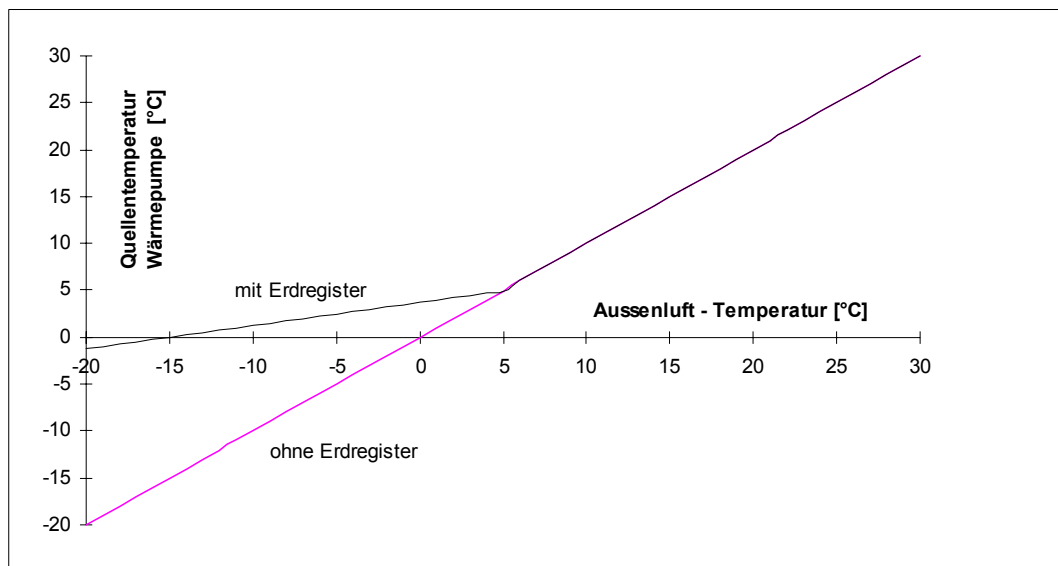


Abbildung 4-21: Einfache Kennlinie des Erdregisters

Für jede Stunde des Jahres wird die entsprechende Erdregistraustrittstemperatur bestimmt und damit das Leistungspotential der WP berechnet.

Wärmepumpe

Der Wärmebedarf des Gebäudes wird über Pufferspeicher gedeckt. Dieser wird von der (nicht leistungsregulierbaren) Wärmepumpe, mit der jeweils zur Verfügung stehenden Leistung geladen. Der COP in Funktion der Aussentemperatur wurde aus einer guten Wärmepumpe abgeleitet, die im Testzentrum „Töss“ ausgemessen wurde. Durch Variation der Pufferkapazität und unter Berücksichtigung der Sperrzeiten des Stromlieferanten kann so das Jahresprofil der effektiven Betriebsstunden der WP konstruiert werden. Dieses kann als Eingabe für die Simulation des Erdregisters verwendet.

4.5 Simulation eines Luft - Erdregisters als Wärmequelle

4.5.1 Vergleich mit monovalenter Wärmepumpe ohne Erdregister

Bei der Grobanalyse der verschiedenen Wärmepumpenanlagen wurden bei den Luft-Wasser-Wärmepumpen nur Anlagen mit vorgewärmter Luft miteinander verglichen. Im Laufe dieser Arbeit wurde jedoch die Frage aufgeworfen, ob es mit den heute erhältlichen Wärmepumpen überhaupt noch notwendig sei, monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpen mit einer Luftvorwärmung auszurüsten. Bis vor noch nicht so langer Zeit wurde diese Frage von den „Energiefachleuten“ immer klar bejaht. Mit den in hergeleiteten Modellen ist es nun aber möglich, diese Frage nicht mehr nur mit einer Kristallkugel in der Hand beantworten zu können.

Es sollen die folgenden Anlagen miteinander verglichen werden:

1. Monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe ohne Vorwärmung
2. Monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Erdregister. Das Erdregister besitze keinen Bypass (Luft immer durch Erdregister angesaugt)
3. Monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Erdregister. Das Erdregister besitzt einen Bypass (Luft nur durch Erdregister angesaugt, wenn Erde wärmer als Aussenluft ist).
4. Monovalente Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Erdregister und Bypass. Die Wärmepumpe wurde dank dem Erdregister auf 0°C Aussenluft dimensioniert.

Das Erdregister weist die folgenden Kenndaten auf:

- Rohrdurchmesser 0.2m
- Rohrlänge 30m
- Anzahl Rohre 15
- Rohrmaterial PE
- Strömungsgeschwindigkeit 2.4 m/s
- λ_E 1.5 W/mK
- Rohr -Verlegetiefe 1 m
- Simulationsbereich 1.5m, nicht adiabat

Als Gebäude und Anlagenkonfiguration wurde eines der Objekte des BEW-Forschungsprojektes „Validierung der Wärmepumpen-Simulationsprogramme YUM / WP-Calc“ verwendet. In diesem Forschungsprojekt wurden sowohl ein konventionelles, wie auch ein Niedrigenergiehaus zur Validierung herangezogen. Für unseren Vergleich haben wir das Niedrigenergiehaus übernommen. Der Heizenergiebedarf dieses Gebäudes kann monovalent mit einer im Testzentrum Töss geprüften, einstufigen Wärmepumpe gedeckt werden (cf Kennlinie Abbildung 4-6), ohne dass zusätzlich ein Elektro-Heizstab eingesetzt werden muss. Die verwendete Splittmaschine ist bis -7°C einsatzfähig und weist von allen bis anhin im in Töss geprüften Maschinen die besten Kennwerte (COP) auf. Die Heizlast für das Gebäude wurde an der EMPA mit dem Programm DOE-2 berechnet und soll auch für unseren Vergleich verwendet werden. Für ein konventionelles Gebäude müsste eine entsprechend grösser dimensionierte Wärmepumpe verwendet werden. Es wäre dabei aber nicht mit einem prinzipiell unterschiedlichen Verhalten der Anlage zu rechnen.

Für die Vergleichs-Variante mit der kleineren Wärmepumpe wurden die Heizleistung und die Stromaufnahme dieser Maschine linear herunterskaliert. Diese imaginäre Wärmepumpe ist also so ausgelegt, dass der Heizleistungsbedarf des Gebäudes mit einem Erdregister im Auslegungsfall ($T_a = -7^\circ\text{C}$) noch monovalent gedeckt werden kann (cf Kennlinie Abbildung 4-6, gepunktete Linie). Die lineare Skalierung bedeutet, dass zwar Stromaufnahme und Wärmeabgabe linear verkleinert werden, dass aber die Leistungsziffer / COP unverändert bleiben. Der energetische Nutzen ergibt sich z.B. durch die geringeren Anfahrverluste und Verluste der Carterheizung, da die kleinere Wärmepumpe im Teillastbereich weniger häufig taktet und längere Laufzeiten aufweist.

4.5.2 Vergleichsmethode

Für die Berechnung wurde die folgende Vorgehensweise festgelegt:

1. Berechnung der Aussenluft-Temperaturen mit der Meteonorm 2.01 (EMPA DRY-Daten für Zürich SMA)
2. Berechnung der Erdregister-Austrittstemperaturen mit dem WKM-Modell aus Kapitel 4.3 Für die Schaltzyklen wurde die im Kapitel 4.4 beschriebene Methode verwendet.
3. Berechnung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe mit dem Wärmepumpen-Simulationsprogramm YUM. Darin sind sowohl Speicherverluste, Abtauverluste wie auch Anfahrverluste und Carterheizung mitberücksichtigt.

Die Bedeutung der Anfahrverluste ist aus Abbildung 4-22 ersichtlich: Bei jedem Anfahrvorgang liefert die Wärmepumpe für einige Minuten schlechtere Leistungsziffern, abhängig von der davor liegenden Stillstandszeit. Können wir also die Wärmepumpe dank des Erdregisters kleiner dimensionieren, so erreichen wir längere Laufzeiten und geringere Stillstandszeiten, wodurch sich die Arbeitszahl erhöht. Das Programm YUM berücksichtigt die Anfahrverluste in Abhängigkeit der davor liegenden Stillstandszeit der Wärmepumpe.

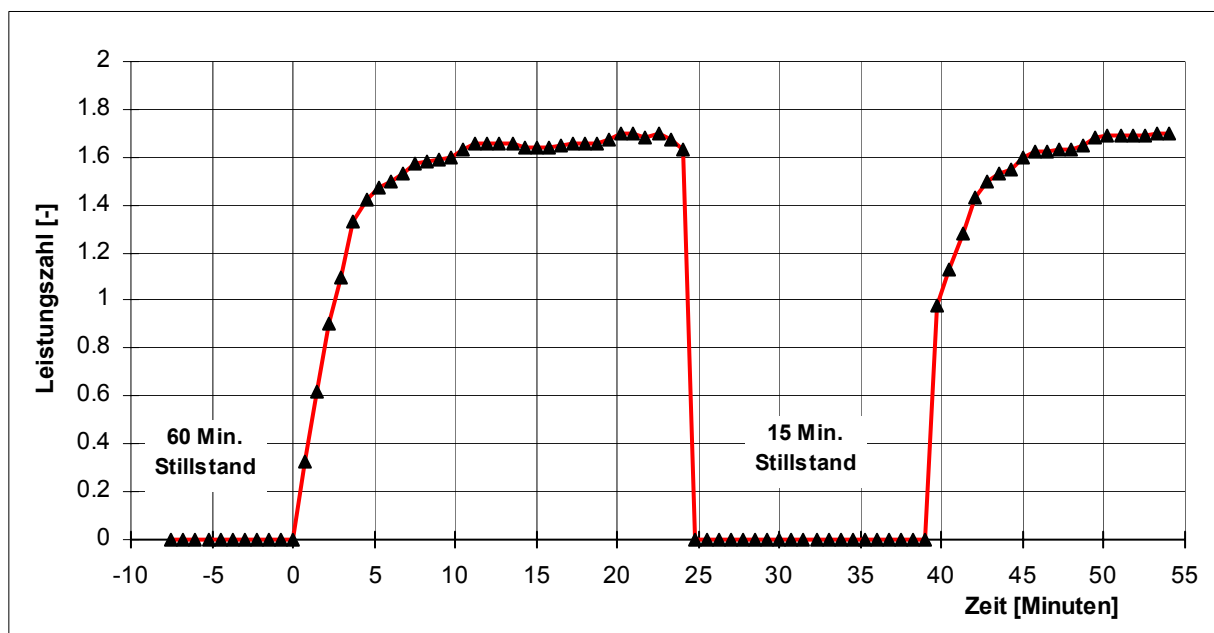


Abbildung 4-22: Gemessene Leistungszahlen beim Anlaufen einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ($-12^\circ\text{C} / 55^\circ\text{C}$). Messung O. Hauser und H.J. Eggenberger. (Hauser et al. 1993)

Da sich das Programm YUM nur bedingt für die Berechnung der Warmwasserproduktion eignet, soll bei unserem Vergleich nur die Heizenergie berücksichtigt werden. Bei den Schaltzyklen für den Betrieb des Erdregisters ist die Brauchwasser-Vorwärmung allerdings mitberücksichtigt.

4.5.3 Ergebnisse des Vergleichs

Die Resultate der Simulation präsentieren sich folgendermassen:

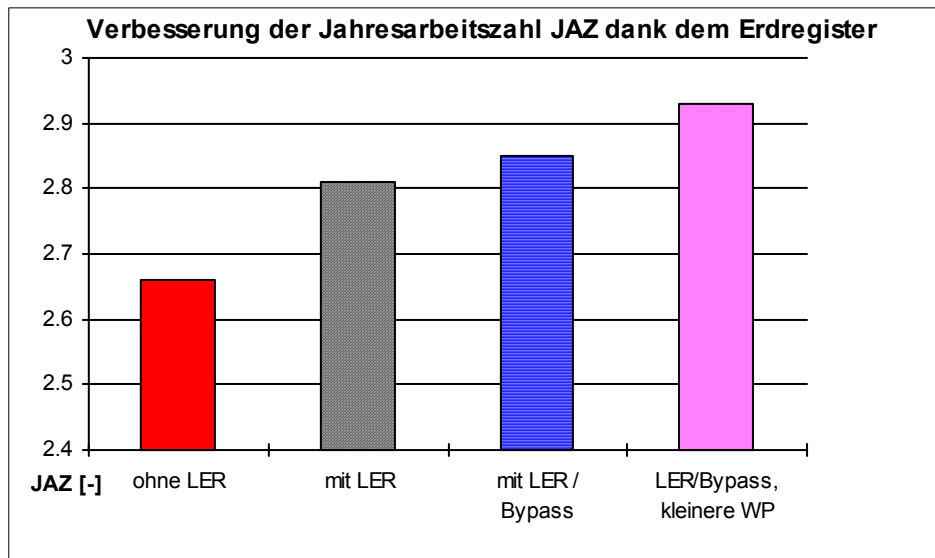


Abbildung 4-23: Einfluss des Erdregisters auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe

Mit dem Erdregister sind ca. 10% bessere Jahresarbeitszahlen erreichbar (ohne Berücksichtigung des Warmwassers). Dabei geht ca. 1/3 der Verbesserung auf das Konto der kleineren Wärmepumpe (weniger Anfahrverluste), die dank dem Erdregister eingesetzt werden kann. In diesem Vergleich ist der Einfluss auf die Abtauverluste und der zusätzliche Druckverlust in den Erdregister-Rohren nicht berücksichtigt. Die Erdregister werden nicht aktiv regeneriert. Die Wärmepumpe im letzten Vergleichsfall ist 20% kleiner und dürfte deshalb etwa 15% billiger sein. Damit lässt sich allerdings das Erdregister nicht finanzieren.

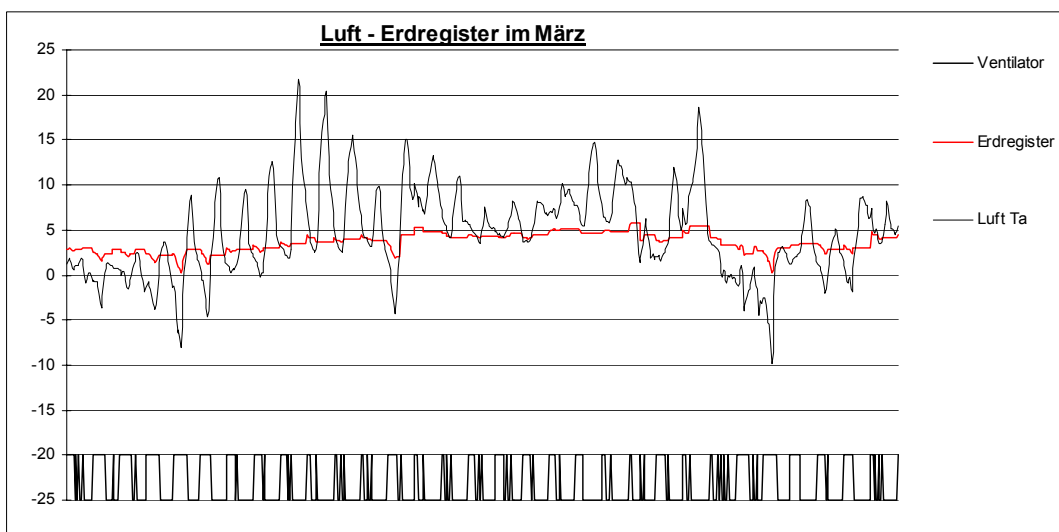
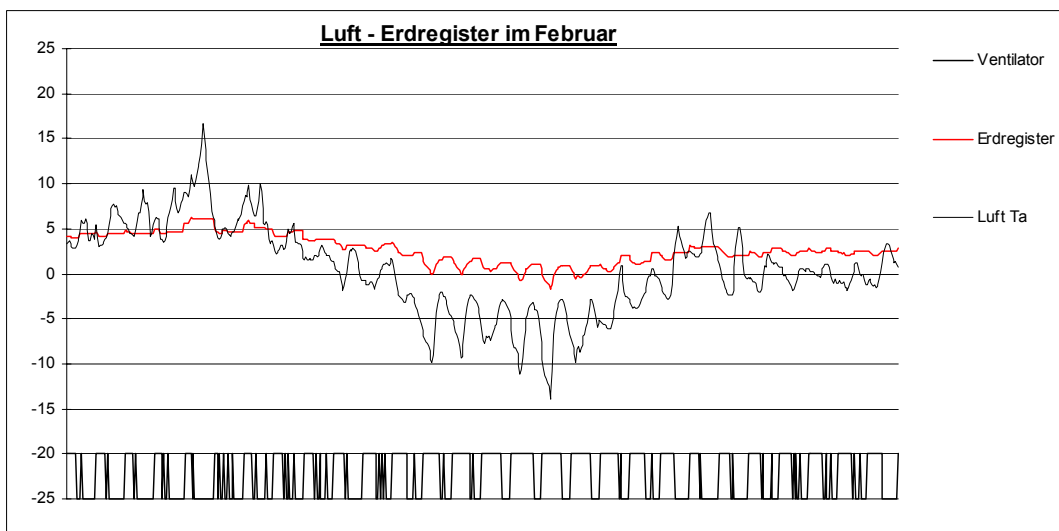
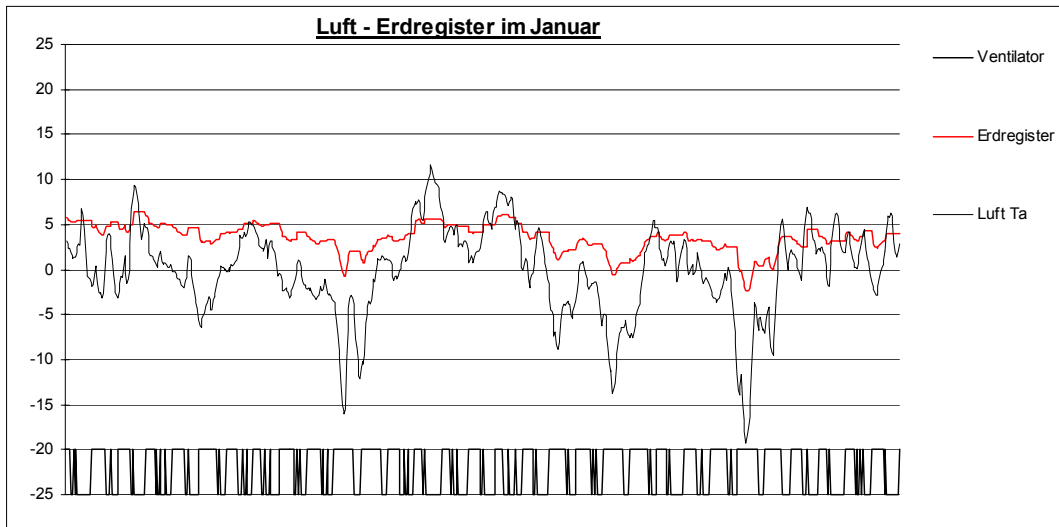


Abbildung 4-24: Erdregister ohne Bypass, Variante 2 des Vergleichs

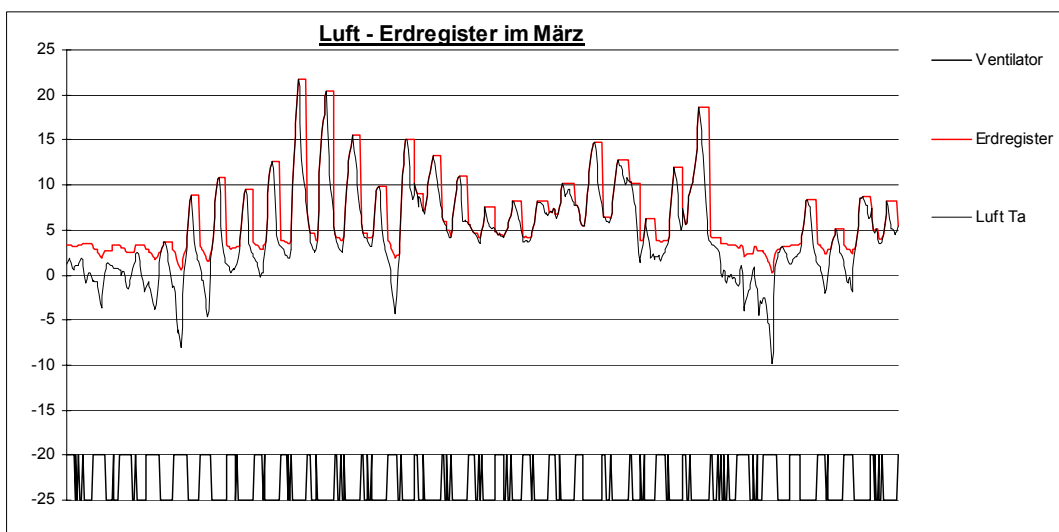
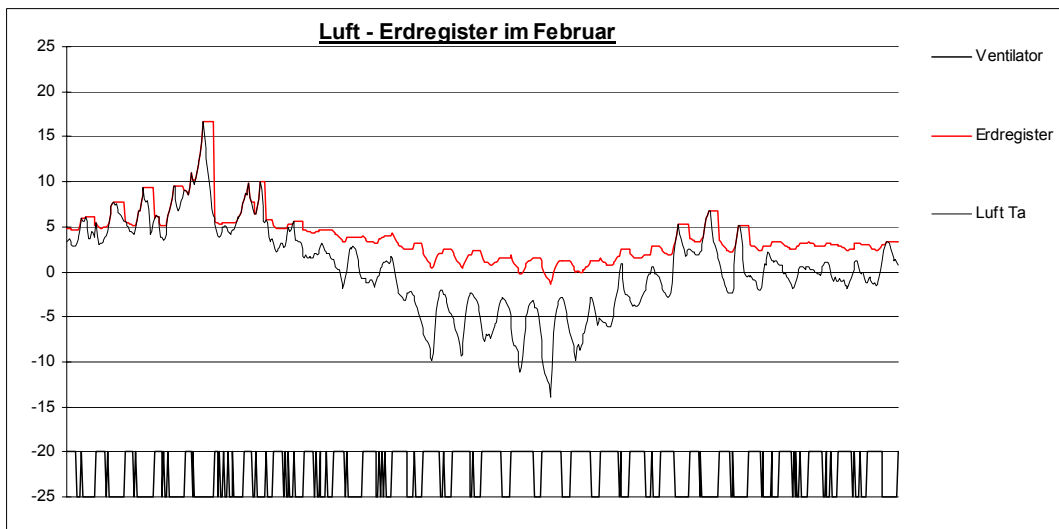
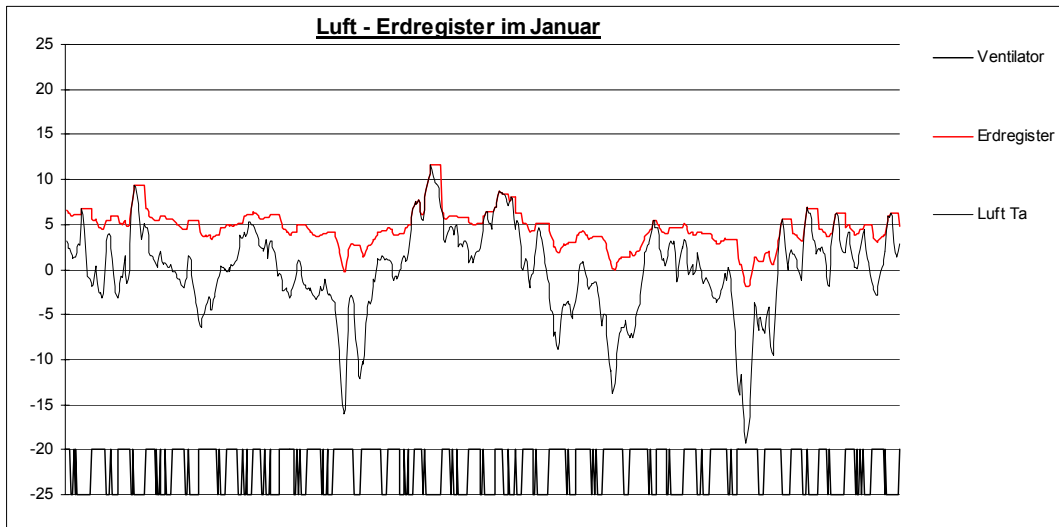


Abbildung 4-25: Erdregister mit Bypass, Variante 3 und 4 des Vergleichs

4.5.4 Einfluss des technischen Speichers („Pufferspeicher“)

Die Speicherverluste haben einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Jahresarbeitszahl einer Anlage. In unserem Beispiel (760 l Speicher mit Stufenladung, für alle Varianten gleich) betragen die Speicherverluste 4.5% der produzierten Heizwärme. Kann dank einer kleineren Wärmepumpe der technische Speicher redimensioniert (oder ev. sogar ganz weggelassen) werden, so verbessert sich die Arbeitszahl entsprechend.

4.5.5 Aktive Regeneration des Erdregisters mit Aussenluft

Im folgenden soll untersucht werden, wie sich eine aktive Regeneration des Erdregisters mit Aussenluft maximal auswirken könnte. Es muss dabei betont werden, dass dafür nicht eine reale Situation simuliert wurde, sondern es wurde untersucht, was maximal erreichbar sein könnte. Dazu wurde ein adiabates Erdregister mit 0.5 m Erde als Speichermasse um die Röhren ein Jahr lang simuliert. Die PE-Rohre haben einen Durchmesser von 0.2m, sind 30m lang und werden mit 2.4 m/s durchströmt. Vorstellen könnte man sich dies als mehrreihiges Erdregister mit 1.2 m Rohrabstand. (Bei einreihigen Erdregistern würde ein Teil der ins Erdreich eingespiesenen Wärme nach aussen wegfließen, der Nutzen der aktiven Regeneration wäre somit kleiner). Als Wetterdaten wurden die EMPA DRY-Daten für Zürich SMA verwendet. Die aktive Regeneration soll immer dann erfolgen, wenn die Wärmepumpe nicht in Betrieb und die Aussenluft wärmer als das Erdreich ist (an der Rohroberfläche gemessen). Diese Strategie kann selbstverständlich nur dann angewendet werden, wenn das Erdregister nicht zum Kühlen verwendet wird.

Die Simulation zeigt, dass im Herbst, wie erwartet das Erdregister ca. 5°C wärmer ist als bei der Referenzsimulation ohne aktive Regeneration (Das Erdregister wurde ja auch praktisch den ganzen Sommer hindurch geladen). Sobald aber der Wärmebedarf des Gebäudes steigt, sinkt diese Differenz auf unter 1°C im Januar. Dies bedeutet, dass genau dann, wenn wir das Erdregister am nötigsten haben, der Nutzen der aktiven Regeneration am kleinsten ist. Noch nicht berücksichtigt ist bei diesem Vergleich die Ventilator-Energie für die Ladung des Erdregisters.

Der Nutzen einer aktiven Regeneration liegt also hauptsächlich in der kurzfristigen (Tag/Nacht) Speicherung. Eine Verbesserung der Wärmepumpen-Leistungsziffer ist somit nur in der Uebergangszeit (wenn die Wärmepumpe sowieso wenig läuft) zu erwarten.

Etwas grösser könnte der Nutzen der aktiven Regeneration für die Warmwasseraufbereitung sein, die ja nicht wie die Heizleistung in der Uebergangszeit (die bei unserem Klima ca. 50% des Jahres ausmacht) abnimmt. Beim Warmwasser will man den Niedertarif in der Nacht ausnutzen, auch wenn die Aussenluft-Temperatur dann am niedrigsten ist. Ein Erdregister, das tags mit warmer Aussenluft geladen wurde, könnte dabei die Wärmepumpen-Leistungsziffer erhöhen.

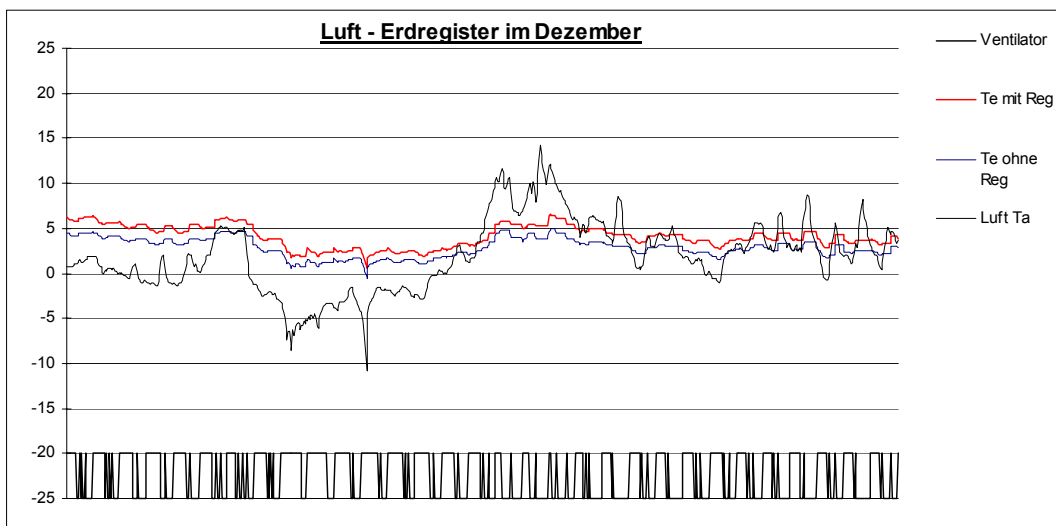
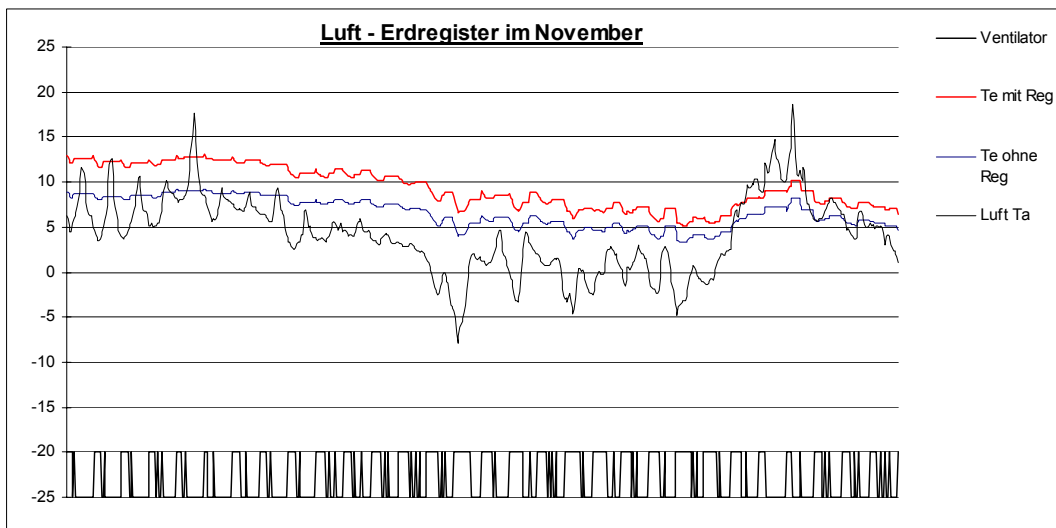
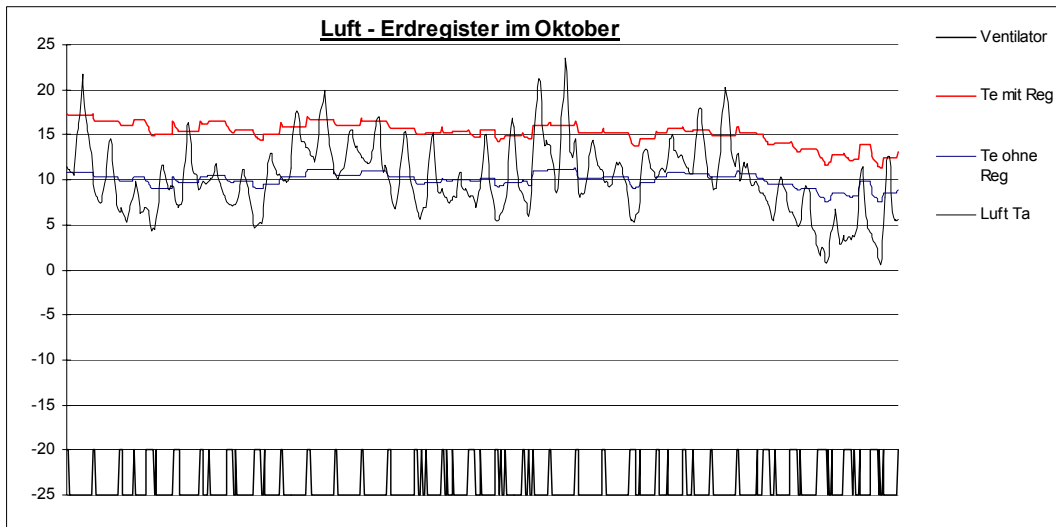


Abbildung 4-26: Vergleich eines Erdregister mit und ohne aktive Regeneration mit Aussenluft

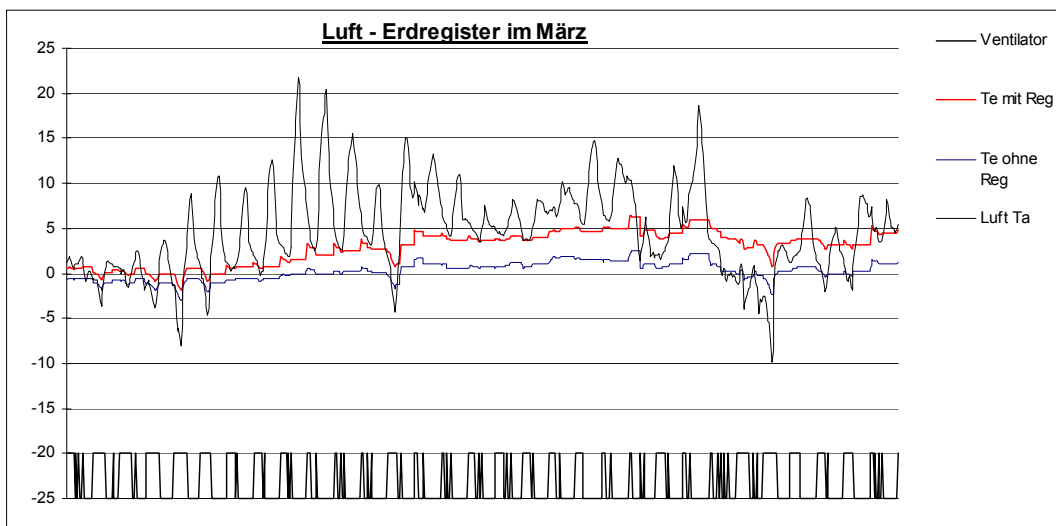
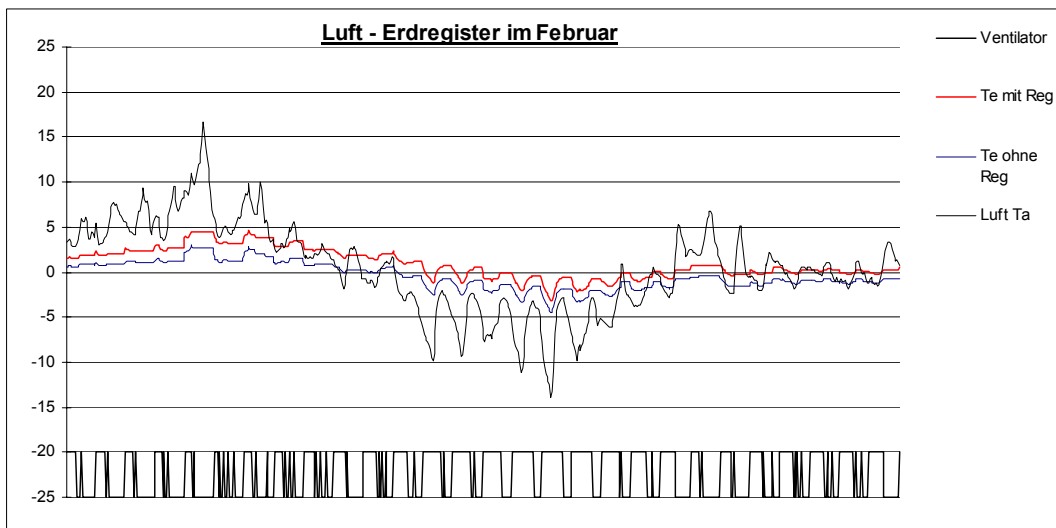
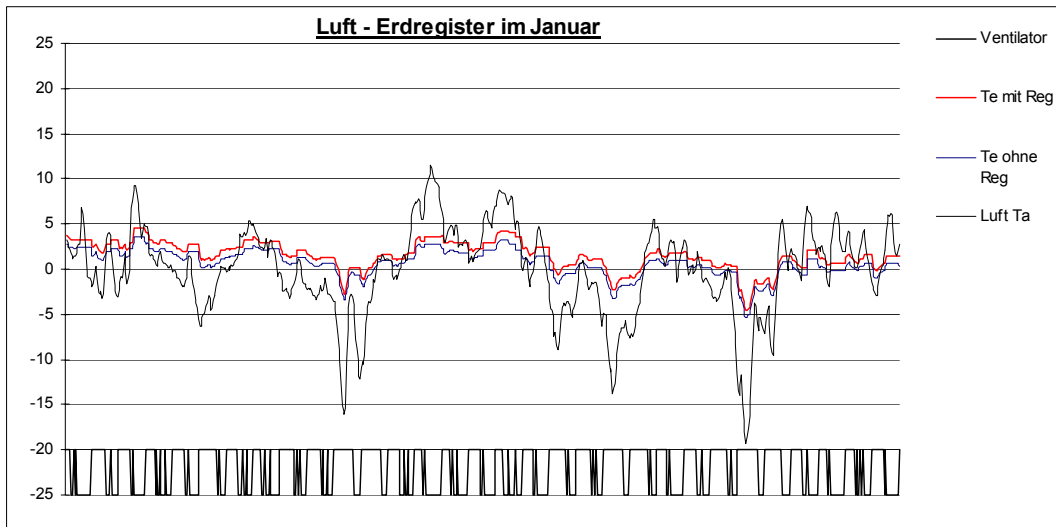


Abbildung 4-27 Vergleich eines Erdregister mit und ohne aktive Regeneration mit Aussenluft

4.6 Simulation eines Schotterkoffers als Wärmequelle

4.6.1 Unterschiede zwischen Schotterkoffer und Erdregister

Lässt sich das dynamische Verhalten eines Schotterkoffers irgendwie mit dem dynamischen Verhalten eines Erdregisters vergleichen? Um diese Frage zu klären wollen wir im folgenden die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Erdregister und Schotterkoffer etwas näher untersuchen. Ein typisches, einreihiges Erdregister ist in Abbildung 4-28 dargestellt. Typisch ist das relativ grosse Erdvolumen, das pro Rohroberfläche als Wärmespeicher zur Verfügung steht.

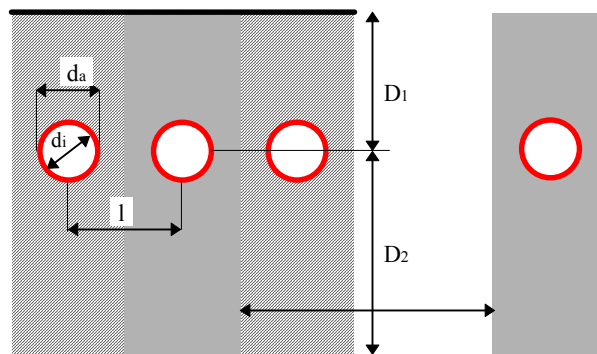


Abbildung 4-28: Einreihiges Erdregister, grosses Speichervolumen pro Rohroberfläche

Im Vergleich dazu steht bei einem mehrreihigen Erdregister bedeutend weniger Speichermasse pro Rohroberfläche zur Verfügung (oder anders gesagt: mehr Austauschfläche pro Speichervolumen). Mehrreihige Erdregister setzen wir deshalb da ein, wo wir eine geringe Eindringtiefe der Temperaturschwankungen haben und eine passive Regeneration aus dem Erdreich (von unten) nicht erwünscht ist. Das mehrreihige Erdregister wird durch aktive Regeneration vom Rohr her selbst wieder aufgeladen. Kleine Eindringtiefen erhalten wir bei hohen Frequenzen, typischerweise Tagesschwankungen mit Eindringtiefen von ca. 0.4m.

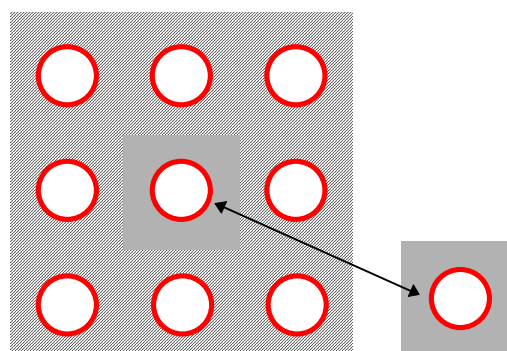


Abbildung 4-29: Mehrreihiges Erdregister, mittleres Speichervolumen pro Rohroberfläche. (System mit aktiver Regeneration)

Ein klassisches Beispiel für ein Gebäude mit einem mehrreihigen Erdregister ist die neue Tropenhalle im Zürcher Zoo (Müller/Flacher, 1994). Dieses grosse Gewächshaus ohne Speichermasse in der Gebäudestruktur speichert aktiv die Ueberschusswärme vom Tag in die Nacht. Das Erdregister wird also mit einer 24h - Periodendauer be- und entladen. Die Durchschnittstemperatur liegt dabei über 20 °C, also weit über dem natürlichen Temperaturniveau des Bodens. Jeder Wärmeaustausch mit dem tieferen Erdreich ist also ein Verlust und somit zu vermeiden. Wir haben dabei somit die idealen Voraussetzungen für ein mehrreihiges Erdregister.

Und der Schotterkoffer? Ein Schotterkoffer zeichnet sich durch eine extrem grosse Oberfläche im Verhältnis zum Speichervolumen aus. Können wir den Schotterkoffer somit nicht einfach als Extremfall eines mehrreihigen Erdregisters betrachten?

Wir wollen den Versuch wagen. Im folgenden soll deshalb ein typischer Schotterkoffer, dimensioniert für die Vorwärmung einer Wärmepumpe mit 5 kW Heizleistungsbedarf, mit den Erdregistermodellen nachgerechnet werden.

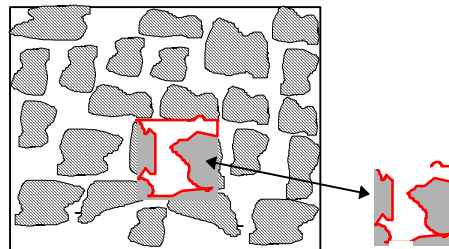


Abbildung 4-30: Oberflächen-Volumen-Verhältnis in einem Schotterkoffer.

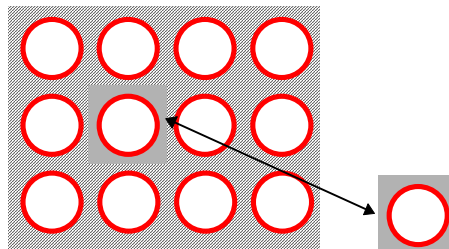


Abbildung 4-31: Erdregister mit dem Oberflächen-Volumenverhältnis eines Schotterkoffers. Der Schotterkoffer kann in seinem thermodynamischen Verhalten prinzipiell mit den Erdregister-Modellen beschrieben werden

4.6.2 Berechnungsmodell des Schotterkoffers

Bei einer Heizleistung nach SIA 384/2 von 5 kW wird nach Eugster / Hopkirk (1994) ein Schotterkoffer von 25 m³ benötigt. Die optimale Höhe des Schotterkoffers sei 0.5 m. Bei einer Länge in Durchströmungsrichtung von 10 m und einer Breite von 5 m ergibt sich eine Querschnittsfläche von 2.5 m². Der daraus resultierende Druckverlust im Schotter wird von Eugster / Hopkirk mit ca. 400 Pa angegeben und liegt somit im empfohlenen Bereich von 200 - 400 Pa. Der Volumenstrom ergibt sich aus der Luftmenge der Luft-Wasser-Wärmepumpe, die für eine Heizleistung von 5 kW

$$\dot{V}_L = 2000 \text{ m}^3 / \text{h} \quad (4-58)$$

beträgt. Nimmt man weiter an, dass ca. 50% des Schotterkoffers aus Schotter und der Rest aus Luft besteht, so erhält man daraus eine durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit der Luft um den Schotter von

$$v_s = 0.44 \text{ m} / \text{s} \quad (4-59)$$

Der Schotter, der im Schotterkoffer typischerweise zum Einsatz gelangt ist hat einen Durchmesser von

$$D_s = 0.038 \text{ m} \quad (4-60)$$

Wir finden somit eine mit dem Schotterdurchmesser gebildete Reynoldszahl von

$$\text{Re}_s = \frac{D_s v_s}{\nu} = 1150 \quad (4-61)$$

Für den Wärmeübergang an der Kugel lässt sich nach Merker (1987) die folgende Beziehung verwenden:

$$\alpha_s = \frac{\lambda_L}{D_s} \left[2 + \left(0.4 \text{Re}_s^{1/2} + 0.06 \text{Re}_s^{2/3} \right) \text{Pr}_L^{0.4} \right] = 12.3 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (4-62)$$

Das Volumen der Speichermasse (Schotter) beträgt bei 50% Schotteranteil:

$$V_s = 12.5 \text{ m}^3 \quad (4-63)$$

Geht man vereinfachend von einer Kugelform des Schotters aus, so beträgt die Oberfläche des Schotters

$$A_s = \frac{6V_s}{D_s} = 1973 \text{ m}^2 \quad (4-64)$$

Will man nun diesen Schotterkoffer mit unseren Erdregistermodellen beschreiben, so sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Volumen des Schotters V_S = Erdregistervolumen
- Schotterradius $D_S/2$ = Erdschicht um Registerrohre
- Rechnung des Erdregister adiabatisch (äußere Randbedingung)
- Luftvolumenstrom Schotterkoffer \dot{V}_L = Luftvolumenstrom im Erdregister
- Stoffwerte Schotter = Stoffwerte Erde
- Wärmeübergang Schotter-Luft ($\alpha_S A_S$) = Wärmeübergang Rohre-Luft ($\alpha_R A_R$)
- Rohrlänge L = Länge des Schotterkoffers (10m)

Das Volumen der Speichermasse im adiabatischen Erdregister mit Länge L und Anzahl Registerrohren n berechnet man somit mit

$$nL \frac{\pi}{4} (2D_S D_R + D_S^2) = V_S \quad (4-65)$$

und der Volumenstrom im Erdregister ist

$$3600nL \frac{\pi}{4} D_R^2 = \dot{V}_S \quad (4-66)$$

Daraus kann der äquivalente Rohrradius D_R berechnet werden. In unserem Fall ist dieser

$$D_R = 0.0099 \text{ m} \quad (4-67)$$

Die Registeroberfläche ist somit

$$nLD_R \pi = A_R = 225 \text{ m}^2 \quad (4-68)$$

berechnet werden. Der äquivalente Wärmeübergangskoeffizient α_R ist damit gegeben durch

$$\alpha_R = \alpha_S \frac{A_S}{A_R} = 108 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (4-69)$$

Die Anzahl Rohre n können unter der Annahme von $L = 10\text{m}$ aus (4-68) berechnet werden:

$$n = \frac{A_R}{LD_R \pi} = 725 \quad (4-70)$$

Im Vergleich dazu wären für eine Heizleistung von 5 kW 3 bis 6 Erdregisterrohre von 200m Durchmesser bei einem Luftvolumenstrom von 2'000 m³/h einzuplanen.

4.6.3 Vergleich Schotterkoffer und Erdregister

Im folgenden wird der nach der oben beschriebenen Methode berechnete Schotterkoffer (berechnet mit dem Widerstands-Kapazitätenmodell) zwei unterschiedlich dimensionierten Erdregistern gegenübergestellt. Die Aussenluft wurde bei beiden Anlagen ganzjährig mit 2000 m³/h durch den Schotterkoffer bzw. das Erdregister angesaugt.

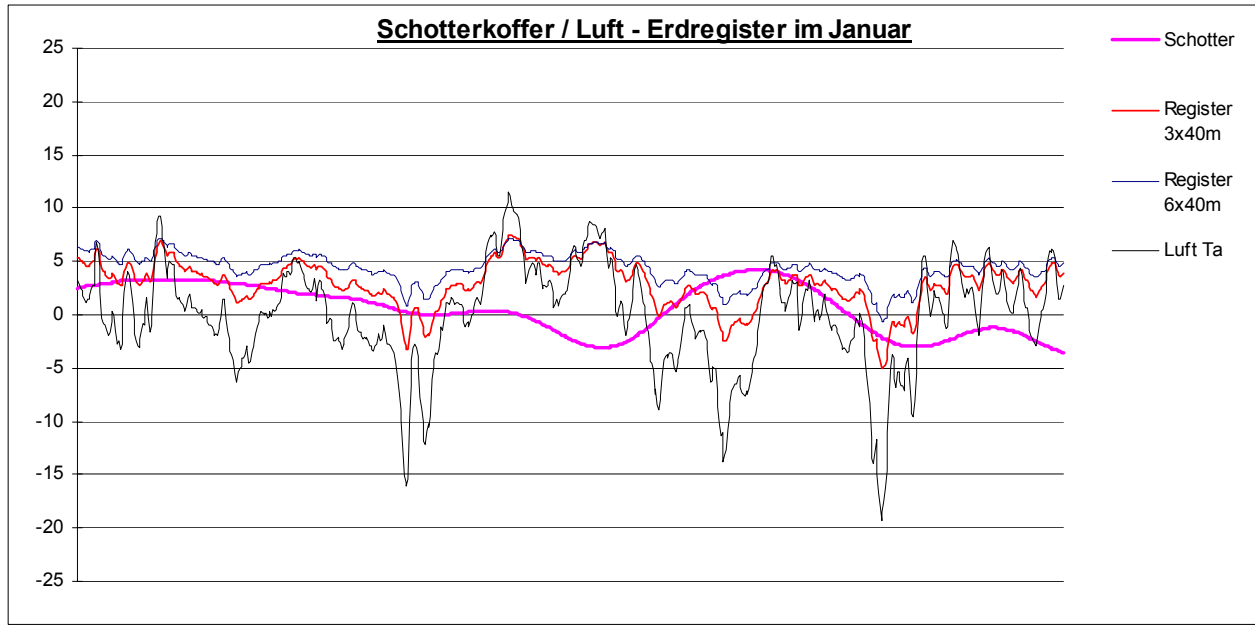


Abbildung 4-32: Verhalten von Schotterkoffer und Erdregister im Januar (immer durchströmt)

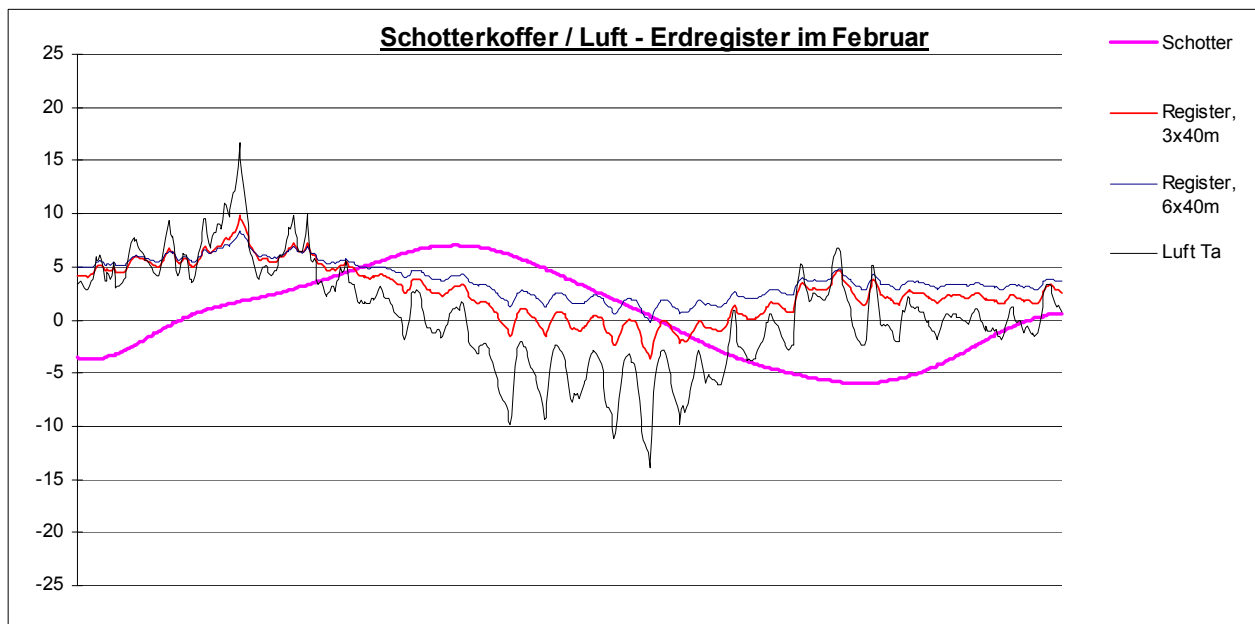


Abbildung 4-33: Verhalten von Schotterkoffer und Erdregister im Februar (immer durchströmt)

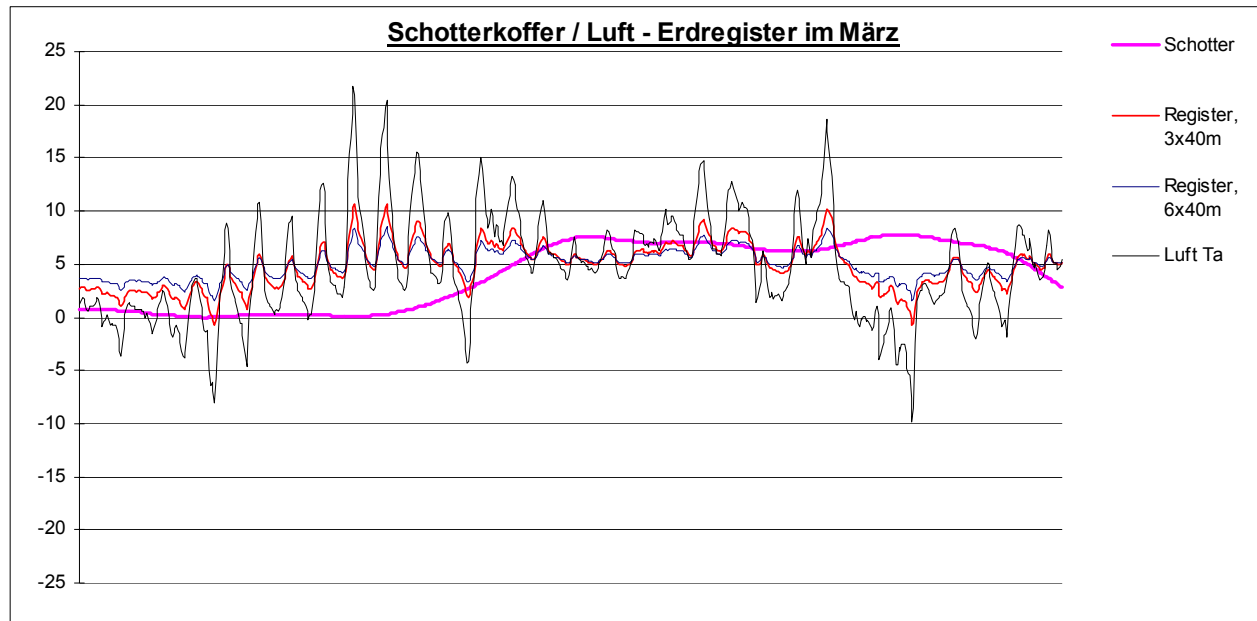


Abbildung 4-34: Verhalten von Schotterkoffer und Erdregister im März (immer durchströmt)

Deutlich sichtbar ist, dass beim Schotterkoffer, der nach Eugster / Hopkirk (1994) dimensioniert wurde, die Tagesschwankungen im Gegensatz zum Erdregister praktisch gänzlich verschwinden. Bei einer starken Ueberdimensionierung der Erdregister wäre dies, falls gewünscht, natürlich auch erreichbar (damit ist aber nur in Ausnahmefällen unter speziellen Randbedingungen ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis zu erzielen). In realen Anlagen würde man selbstverständlich im Heizfall bei wärmeren Aussenlufttemperaturen die Luft nicht durch den Schotterkoffer oder das Erdregister ansaugen. Dadurch entfällt aber speziell beim Schotterkoffer die Regeneration, wodurch die Temperaturen im Heizfall im Schotterkoffer tendenziell sinken würden. Eine passive Regeneration vom Erdreich an den Schotterkoffer findet kaum statt, da die Luft zwischen dem Schotter (wenn die Anlage nicht läuft) gegenüber der Speichermasse isolierend wirkt. Wasser als Wärmetransportmedium vom Erdreich in den Schotter ist wegen den Abtauverlusten in der Wärmepumpe nicht erwünscht (cf Eugster / Hopkirk 1994). Schotterkoffer könnten mit Aussenluft aktiv regeneriert werden. Dabei ist allerdings der 3 - 4 mal grössere Druckabfall bei Nennlast-Volumenstrom im Schotter verglichen mit den Erdregistern zu bedenken.

Auch das analytische Modell für die Erdregister liefert das gleiche Verhalten für den Schotterkoffer (cf. Abbildung 4-35 und Abbildung 4-36): Die Amplitudendämpfung für Tagesschwankungen beträgt beinahe 100%.

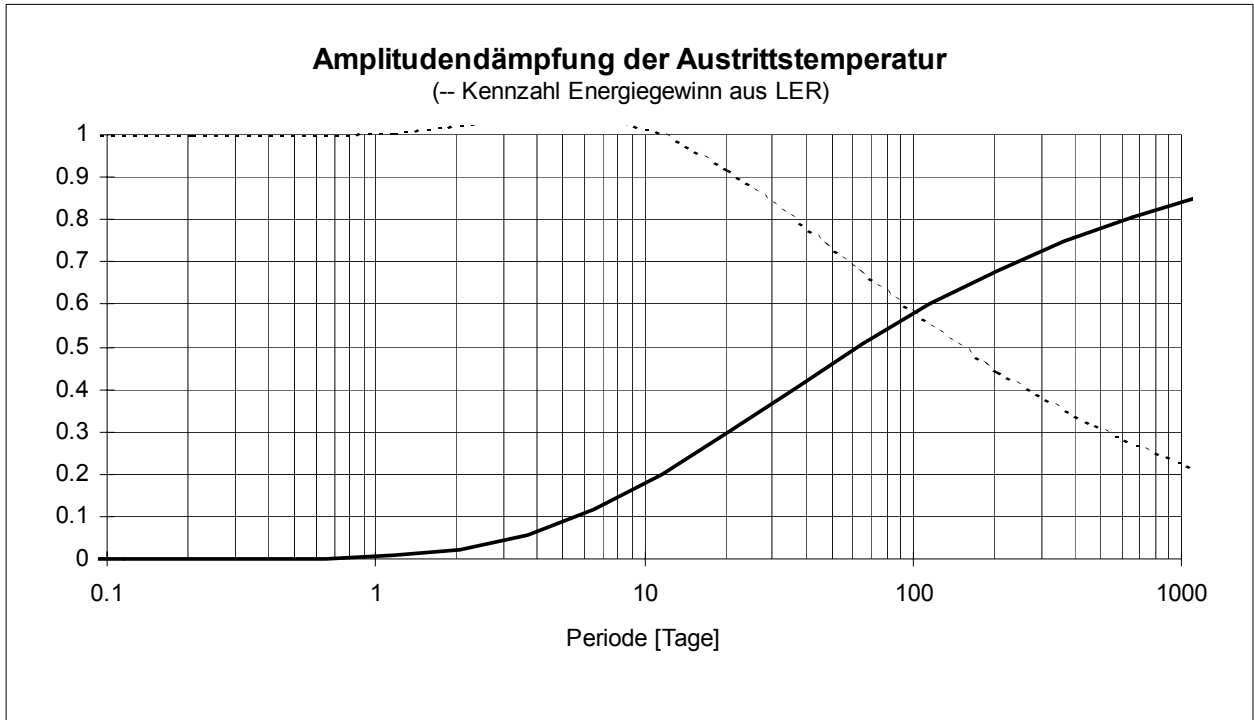


Abbildung 4-35: Amplitudendämpfung eines Schotterkoffers, dimensioniert nach Eugster/Hopkirk (1994)

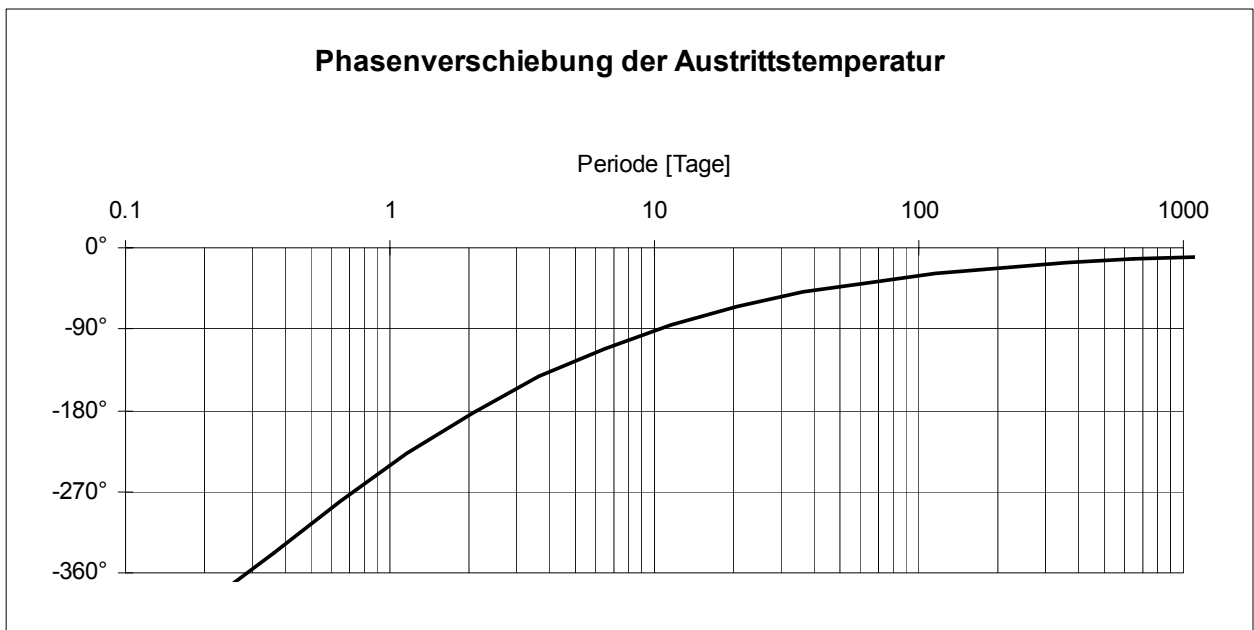


Abbildung 4-36: Phasenverschiebung eines Schotterkoffers, dimensioniert nach Eugster/Hopkirk (1994)

4.6.4 Messungen an einem Schotterkoffer

Zu beachten ist, dass die für den Schotterkoffer verwendeten Modelle nicht validiert sind. Quantitative Aussagen über das Verhalten des Schotterkoffers sollen deshalb in dieser Arbeit nicht gemacht werden. Ein qualitativer Vergleich mit einer Messung an einem Schotterkoffer (Abbildung 4-37, Diplomarbeit von A. Akçay, Ingenieurschule Muttenz, an Schotterkoffer in Kaiseraugst) zeigt nicht das berechnete, phasenverschobene Verhalten. Es scheint, dass der Wärmeaustausch Luft - Schotter doch geringer ist, als angenommen und dass der Schotterkoffer meist stärker von der Umgebung (Keller / Erdreich) beeinflusst wird als in unserer adiabaten Rechnung. Bestätigt wird aber das in der Rechnung vorausgesagte, prinzipielle Verhalten eines Schotterkoffers, dank der grösseren Austauschfläche viel weniger schnell der Aussentemperatur zu folgen als ein Erdregister dies typischerweise tun würde.

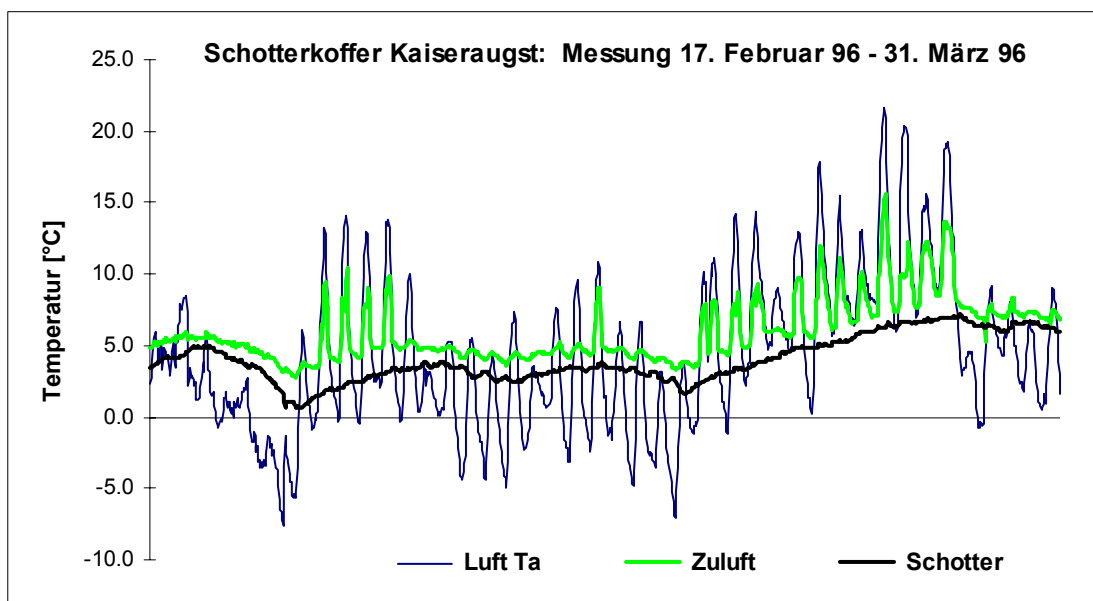


Abbildung 4-37: Messung an einem Schotterkoffer in Kaiseraugst. (Diplomarbeit von A. Akçay, Technikum Muttenz, Anlagenplanung H.J. Eggenberger)

4.7 Systemsimulation eines Erdregisters mit Lüftungsanlagen

4.7.1 Einführung

Um die dynamischen Gewinne einer Erdregister-Anlage quantifizieren zu können, wird eine exemplarische Anlage mit den entsprechenden Betriebsstrategien simuliert. Es soll dabei vor allem der Effekt einer aktiven Regeneration untersucht werden, d.h. die Wiederaufladung des Erdregisters in einer Phase, wo z.B. durch Sonneneinstrahlung im Winter zu viel Energie im Gebäude vorhanden ist.

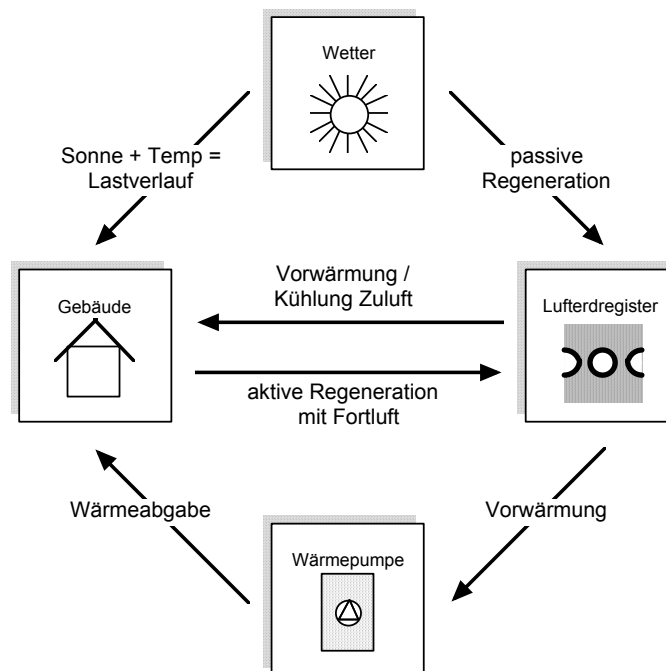


Abbildung 4-38: Schematische Darstellung des simulierten Systems.

Das Lastverhalten des Gebäudes wird vom Gesamtsystem entkoppelt und separat berechnet. Die Anbindung geschieht durch die Übergabe von Stundenwerten für Wärme- bzw. Kältebedarf, Strukturtemperatur und Belegungszustand. Aufgabe der gebäudetechnischen Anlage ist es, diesen Energiebedarf zu jeder Zeit zu erbringen.

4.7.2 Gebäude

Beim betrachteten Gebäude handelt es sich um ein modernes Geschäftshaus mit Glasfassade. Die gesamte Fassadenfläche teilt sich auf in 56% Glas, 14% Rahmen und 30% Brüstung. Es wurde bewusst eine gut wärmegeämmte Bauweise gewählt, welche hohe Sonnengewinne erwarten lässt, so dass auch im Winter Wärmeüberschüsse erwartet werden können. Die Grundfläche beträgt 700 m² (20 x 35 m), die Geschosshöhe beträgt 3 m.

Heizenergiebedarf	103 MJ/m ² a	60268 kWh
Kühlenergiebedarf	102 MJ/m ² a	59263 kWh
Volumen		6300 m ³
Grundrissfläche		700 m ²
Stockwerke		3
Fensterfläche		554 m ²

Tabelle 4-2: Energiekennzahlen und

Das Gebäude besitzt eine Lüftungsanlage, welche jeweils zu Betriebsstunden (7:00 bis 19:00 werktags) oder bei Kühlbedarf in Betrieb ist. Bei erhöhter Kühllast kann auch auf einer zweiten Stufe des Ventilators eineinhalb mal mehr Luft ins Gebäude geblasen werden.

	Tag	Nacht
K	1.66	0.79
γ	0.15	0.32
τ_{eff}	55.6	116.6

Tabelle 4-3. Dynamische Kennzahlen für Tag- / Nachtbetrieb (mit und ohne Lüftung)

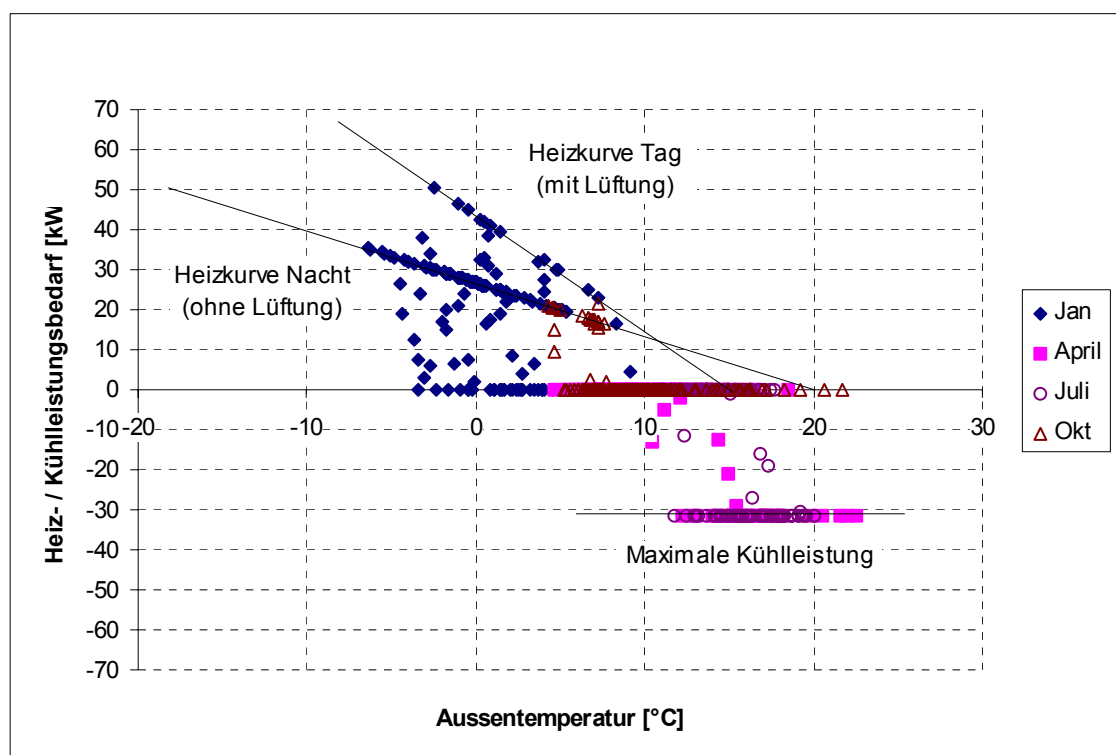


Abbildung 4-39: Lastverhalten (Stundenwerte) in der ersten Woche der Monate Januar, April, Juli und Oktober.

Das Gebäudeverhalten wird in einer Excel-Simulation berechnet und als Stundenwerte für Heiz- bzw. Kühlbedarf bereitgestellt. Für die Berechnung wird das Modell von Burmeister (1995) herangezogen. Da die Lüftung in die Kennzahlen γ und τ eingeht, werden zwei Kennzahlenpaare verwendet: Einmal mit (Tages- bzw. Kühlbetrieb) und einmal ohne Lüftung (Nachtbetrieb bzw. Wochenende).

In Abbildung 4-39 sehen wir die Gebäudelast in Abhängigkeit der Aussentemperatur für jeweils die erste Woche der Monate Januar, April, Juli und Oktober. Wir erkennen die beiden unterschiedlichen Heizkurven für die Fälle mit und ohne Lüftung, sowie die vorgegebene maximale Kühlleistung.

Dass diese Kühlleistung tatsächlich ausreicht, um komfortable Temperaturen im Gebäude zu gewährleisten, sieht man in Abbildung 4-40. Nur während etwa 500 Stunden im Jahr steigt die Innentemperatur über die vorgegebenen 25 °C bis auf maximal 28 °C. Die Mindesttemperatur von 20°C wird nie unterschritten.

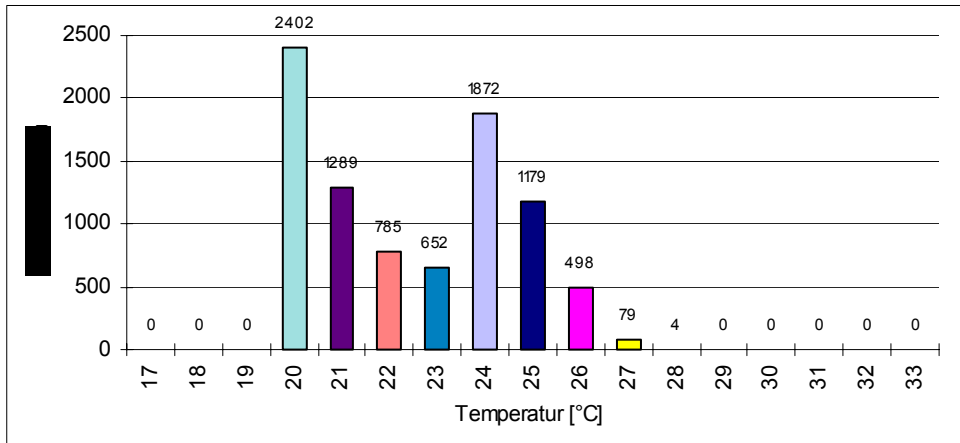


Abbildung 4-40: Histogramm der Innentemperatur.

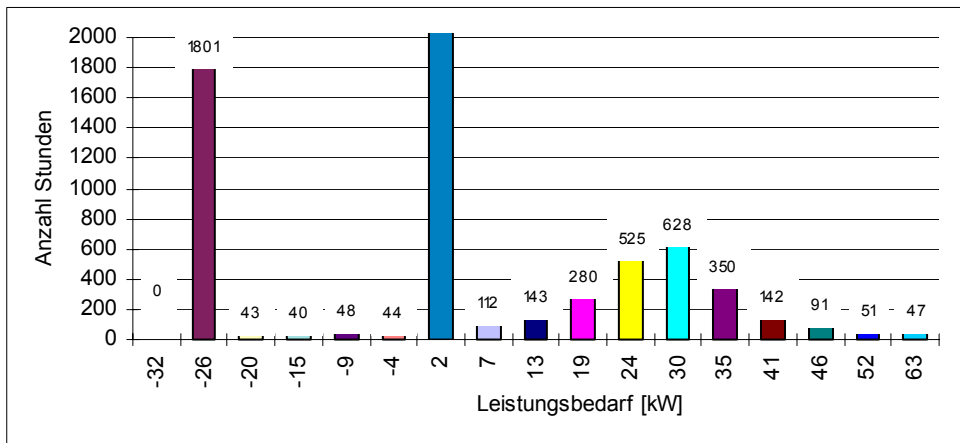


Abbildung 4-41: Histogramm des Heiz- / Kühlleistungsbedarfs. Die Kategorie "2" schliesst den neutralen Fall ohne Leistungsbedarf ein.

Bei der Verteilung von Heiz- und Kühlleistung (Abbildung 4-41) sieht man, dass der maximale Heizleistungsbedarf nur selten anfällt. Der häufigste Lastfall liegt zwischen 24 und 35 kW. Somit wird die Heizungsanlage häufig im Teillastbereich betrieben werden. Fällt dagegen Kühllast an, so ist diese sofort auf dem Maximalniveau.

4.7.3 Technische Anlage

In dieser Simulationsreihe werden vier verschiedene gebäudetechnische Anlagen (bzw. Betriebsstrategien) gegenübergestellt. Allen Anlagen ist gemeinsam, dass die Wärmeleistung von einer Luft-Wasser-Wärmepumpe erbracht wird, welche die Wärme über ein statisches Heizsystem (Bodenheizung) abgibt. Es gibt eine Lüftungsanlage, welche während den Betriebszeiten eine hygienische Luftmenge ins Gebäude bringt. Zusätzlich wird die Lüftung bei Kühlbedarf eingeschaltet; bei erhöhtem Bedarf auf einer 2. Stufe.

Das Erdregister ist aufgebaut aus 72 PVC-Kanalisationsrohren à 20 m Länge mit 200 mm Durchmesser. Somit können die Röhren zweilagig unter der Gebäudegrundfläche von 35 x 20 m mit einem Rohrmittenabstand von ca. 1 m verlegt werden.

Je nach Anlage (Strategie) wird die Aussenluft in einem Lufterdregister (LER) vorkonditioniert. Wir sprechen von Strategien, weil mit der komplexesten Anlage auch die „einfachen“ Strategien der anderen Anlagen gefahren werden können.

Die Referenzanlage (Strategie 0) verfügt nicht über ein Erdregister. Die Zuluft wird direkt auf Aussentemperaturniveau angesogen.

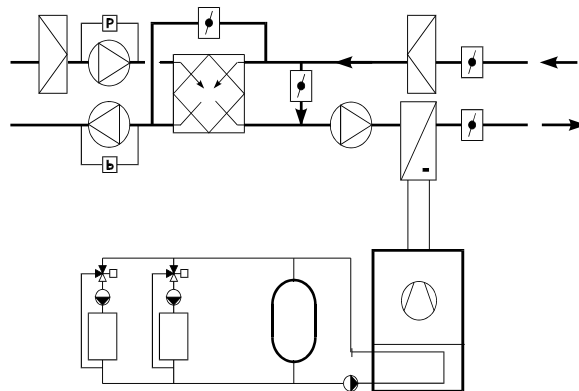


Abbildung 4-42. Anlage mit Lüftung ohne Erdregister.

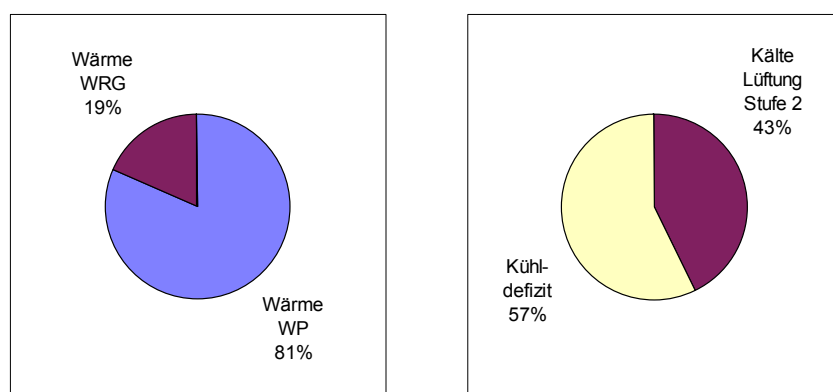


Abbildung 4-43. Heiz- bzw. Kühlenergiebereitstellung. Strategie 0 (ohne Erdregister).

Um den Heizenergiebedarf des Gebäudes zu decken, erbringt die Wärmepumpe (WP) 49500 kWh, das sind 81% des Heizenergiebedarfs. Der Rest wird von der Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) gedeckt. Der mittlere COP der WP liegt bei 3.1.

Kühlleistung kann dem Gebäude ohne LER nur durch die zweite Lüftungsstufe zugeführt werden. Es können so 43% (25300 kWh) des anfallenden Kühlenergiebedarfs gedeckt werden.

Strategie 1

Die zweite Anlage besitzt ein Erdregister, welches fest in den Zuluftstrom geschaltet ist (Strategie 1). Die Zuluft wird also immer auf Erdregistertemperaturniveau gebracht.

Durch die zusätzliche Wärmeabgabe durch das LER müssen nur noch 74% bzw. 48300 kWh von der WP erbracht werden. Gleichzeitig erhöht sich der mittlere COP um 9% auf 3.3. Der Beitrag der WRG liegt bei 20% (13300 kWh), derjenige des LER bei 6% (4000 kWh). Die mittlere Oberflächentemperatur an der Rohrinnenseite des LER liegt bei 9.2 °C, also leicht über der Jahresmitteltemperatur. Das deutet darauf hin, dass das LER mehr Kühl- als Heizleistung erbringen muss. Der Kühlenergiebedarf kann dank des LER auch bis auf 4% gedeckt werden. Die normale Lüftung bringt 42% bzw. 24800 kWh der Kühlenergie, 54% werden auf der zweiten Lüftungsstufe gebracht (32000 kWh).

Das Sparpotential an elektrischer Energie liegt gegenüber der Referenzanlage bei 22700 kWh (bei einer Gewichtung der Kühlenergie von 0.67).

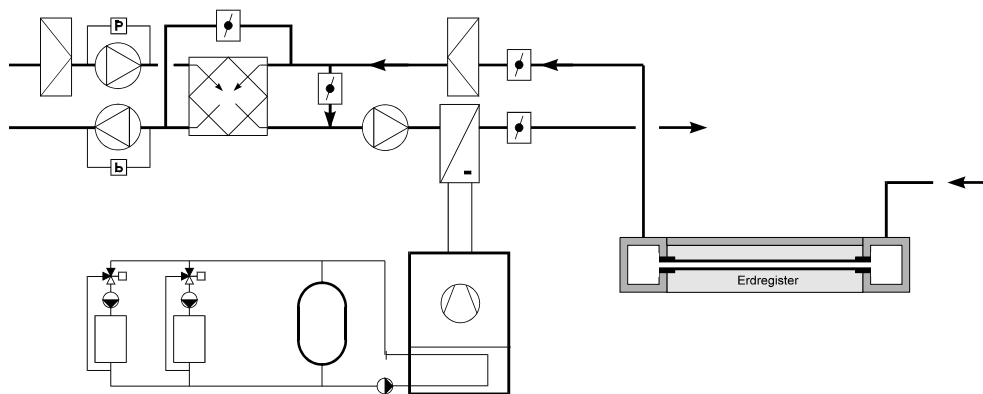


Abbildung 4-44. Anlage mit Lüftung und Erdregister, fest in den Zuluftstrang geschaltet

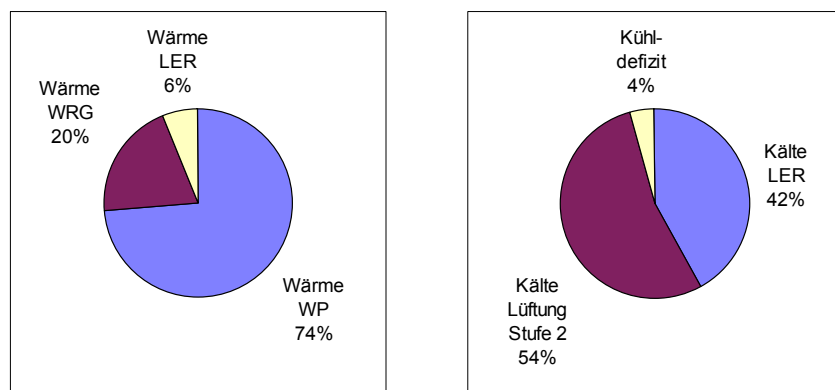


Abbildung 4-45. Heiz- bzw. Kühlenergiebereitstellung. Strategie 1 (Erdregister immer in Zuluft).

Strategie 2

Bei der dritten Anlage gibt es zusätzlich eine Klappe für direkte Aussenluftzufuhr. Dies hat den Vorteil, dass die Luft nur dann durch das LER gezogen werden muss, wenn es auch „etwas bringt“. Das bedeutet im Heizfall, dass die LER-Temperatur höher sein sollte als die Aussentemperatur. Und umgekehrt im Kühlfall muss das LER eine Abkühlung der Aussenluft bringen können.

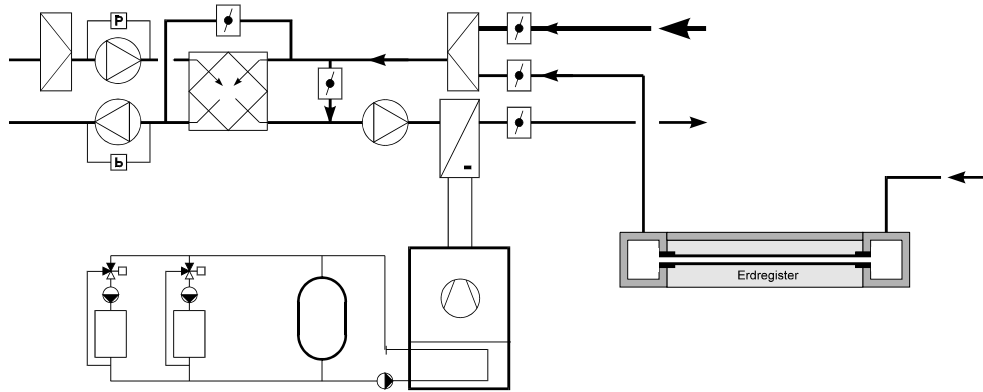


Abbildung 4-46. Anlage mit Lüftung und Erdregister, welches unter günstigen Bedingungen in den Zuluftstrang geschaltet wird.

Durch diese Massnahme kann die Effizienz der Anlage noch ein wenig gesteigert werden. Der mittlere COP der WP steigt auf 3.4. Besonders verbessert wird jedoch die Kühlleistung. Nur noch 3% des Kühlbedarfs können nicht gedeckt werden. Gleichzeitig sinkt die Laufzeit der Lüftungsanlage auf Stufe 2 um 13%, d.h. ein grösserer Anteil der Kühlenergie kann auf der energiesparenden ersten Stufe erbracht werden. Die mittlere Erdregister-Temperatur liegt bei 8.7 °C, d.h. leicht unter der Jahresmitteltemperatur. Gegenüber der Referenzanlage ohne Erdregister können 23200 kWh an elektrischer Energie eingespart werden.

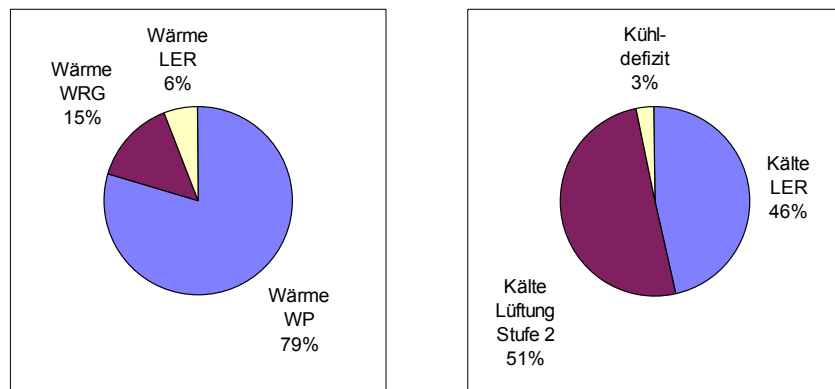


Abbildung 4-47. Heiz- bzw. Kühlenergiebereitstellung. Strategie 2 (Erdregister in Zuluft wenn günstig).

Strategie 3

Die letzte betrachtete Anlage verfügt zusätzlich zu den Eigenschaften der vorigen Anlage noch über eine aktive Regenerationsmöglichkeit des Erdregisters. So kann z.B. in einem sogenannten Winterkühlfall Energie ins Erdregister zurückgespiessen werden. Der Winterkühlfall kann eintreten, wenn bei tiefen Aussentemperaturen (Heizfall gemäss Heizkurve) die Sonneneinstrahlung so gross wird, dass diese zusammen mit der WRG ausreicht, um den momentanen Wärmeleistungsbedarf zu decken. In diesem Fall wird die Wegluft durch das Erdregister geführt und kann dort ihre Wärmeenergie ans Erdreich abgeben.

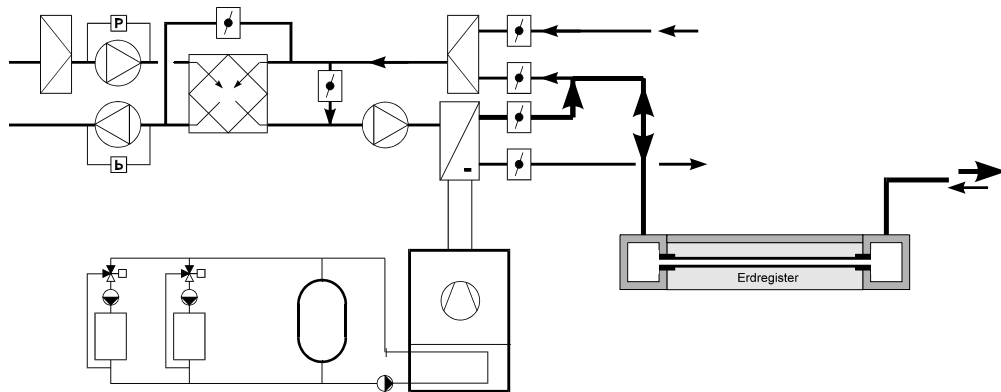


Abbildung 4-48. Anlage mit Lüftung und Erdregister, welches unter günstigen Bedingungen in den Zuluftstrang geschaltet wird, und gegebenenfalls mit Fortluft regeneriert wird.

Wie erwartet bringt diese Anlage den besten mittleren COP der WP (3.5) und die höchste Mitteltemperatur des Erdregisters (10.5 °C). Der Regenerationsfall tritt während über 1000 Stunden im Jahr auf, 13000 kWh können auf diese Art ins Erdregister zurückgespiessen werden. Durch das erhöhte Temperaturniveau im Erdregister nimmt jedoch das Kühlpotential leicht ab, das Kühldefizit liegt ungefähr wie bei Strategie 1 bei 4% (2600 kWh). Das Sparpotential an elektrischer Energie beträgt 23200 kWh.

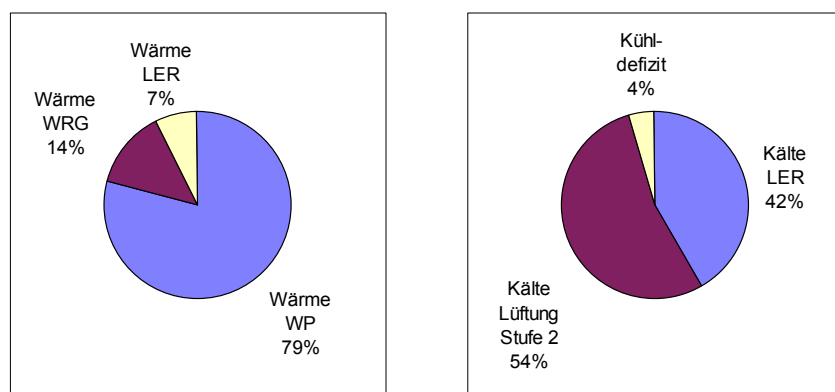


Abbildung 4-49. Heiz- bzw. Kühlenergiebereitstellung. Strategie 3 (Erdregister mit Regeneration).

4.7.4 Betriebszustände

Der Wärmebedarf des Gebäudes kann grundsätzlich mit der Wärmepumpe gedeckt werden, welche zusammen mit einem Speicher betrieben wird. Dabei ist die WP so gesteuert, dass sie den Speicher immer zwischen einer unteren und oberen Grenze hält.

Zusätzlich kann dem Gebäude Wärme in der Zuluft zugeführt werden. Dabei können sowohl die WRG wie auch das Erdregister als Energielieferanten dienen. Abbildung 4-50 zeigt einen typischen Heizfall mit laufender Lüftung. Ein Teil des Wärmeleistungsbedarfs (Q_{load}) kann von der Lüftung gedeckt werden, wobei die Luft zuerst im Erdregister (mit der Leistung Q_{ler}) vorgewärmt wird, und anschliessen in der WRG nochmals Energie erhält (Q_{wrg}). Der Rest muss von der Wärmepumpe bzw. aus dem von der WP gespeisenen Speicher geliefert werden (Q_{wp}). In der Nacht oder am Wochenende muss die ganze Wärmeleistung von der WP erbracht werden (Abbildung 4-51).

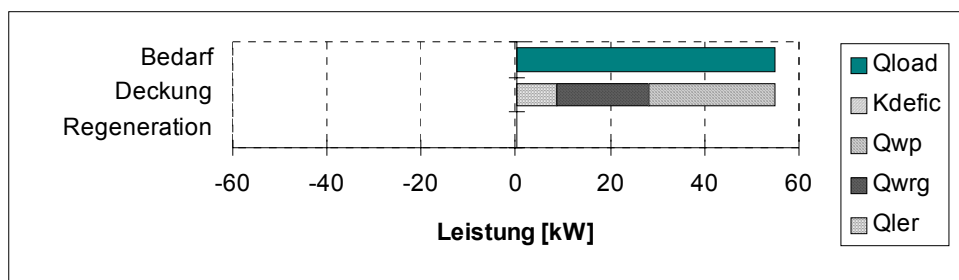


Abbildung 4-50: Heizfall mit Lüftung.

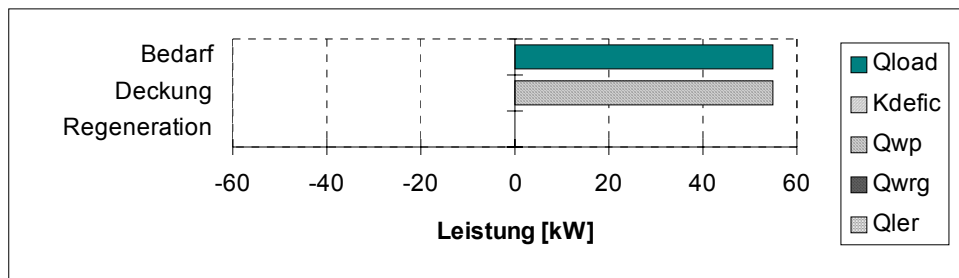


Abbildung 4-51: Heizfall ohne Lüftung.

In der Übergangszeit bzw. bei hohem Sonnenlichteinfall kann es vorkommen, dass LER und WRG zusammen den gesamten Wärmeleistungsbedarf decken können (Abbildung 4-52).

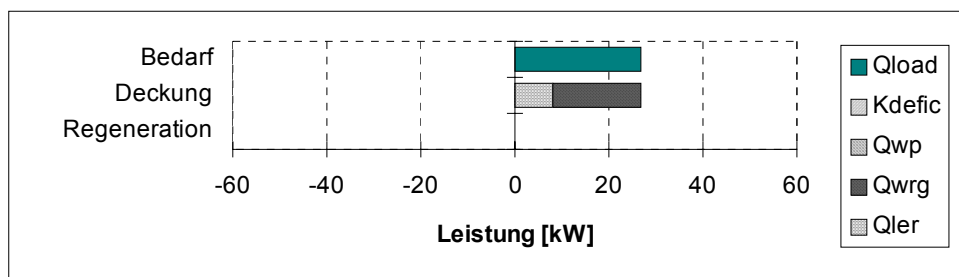


Abbildung 4-52: Heizfall ohne Wärmepumpe. WRG und Erdregister decken vollen Wärmebedarf.

Wenn nun der netto Wärmeleistungsbedarf noch weiter sinkt, oder sogar null wird, ist es nicht mehr nötig, das Erdregister in die Zuluft zu schalten. Es kann dann die Fortluft durch das Erdregister geführt werden, und so das Erdregister aktiv regenerieren (Abbildung 4-53). Gerade bei modernen, sehr gut isolierten Gebäuden mit grossen Fensterflächen ist anzunehmen, dass dieser Fall gerade auch im Winter recht häufig eintreten könnte. Das Erdregister wird dann zum Kurzzeitwärmespeicher.

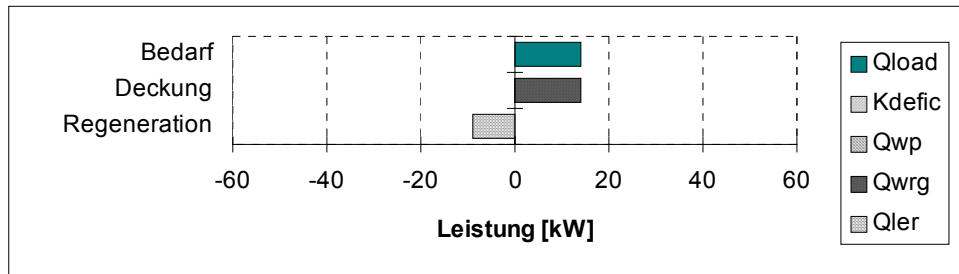


Abbildung 4-53: Heizfall mit Regeneration des Erdregister. WRG deckt ganzen Wärmebedarf, Erdregister wird in der Fortluft betrieben.

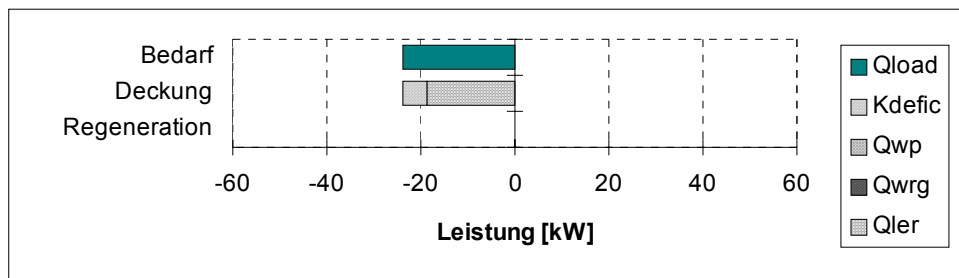


Abbildung 4-54: Kühlfall mit Lüftung. LER deckt Kühlbedarf (ev. Lüftung auf zweiter Stufe). Bei zu grosser Kühlleistung entsteht ein Kühldefizit.

In Abbildung 4-54 sehen wir denn Kühlfall im Sommer. Es besteht durch Sonneneinstrahlung und interne Lasten ein grosser Kühlbedarf, welcher durch die Lüftung (ev. auf zweiter Stufe) und das LER gedeckt werden müssen. Unter extremen Bedingungen kann es sein, dass diese Kühlleistung nicht erbracht werden kann. Es entsteht dann ein „Kühldefizit“ (Kdefic).

Die Wärmepumpe für die Simulationen wurde durch die folgenden Kennlinien charakterisiert.

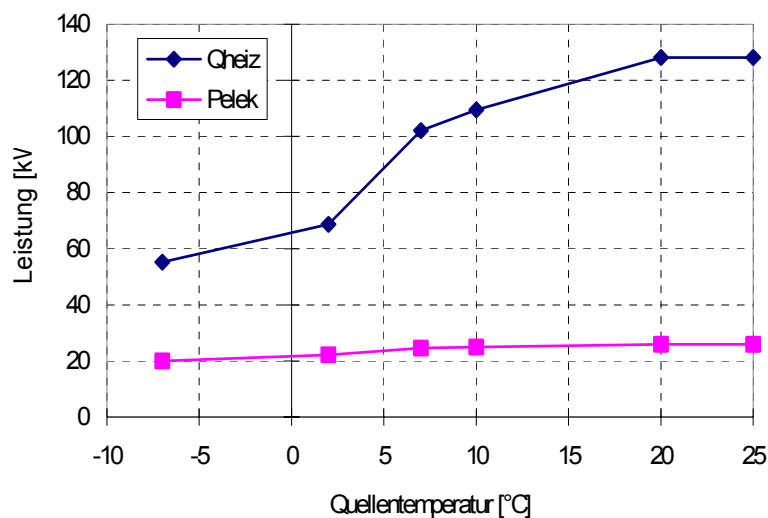


Abbildung 4-55: Kennlinien der verwendeten Wärmepumpe

5 Validierung der Erdregistermodelle an der ETH

In der Kosten/Nutzen-Analyse wird zur Quantifizierung des Nutzens einerseits ein „Widerstands-Kapazitätenmodell“ (finite Differenzenmethode), und andererseits eine Frequenzmethode (analytisch) eingesetzt. Früher verwendete Modelle (z.B. Modell von Ghazi / Baumgartner) vernachlässigen die thermische Speicherfähigkeit des Erdreiches und sind deshalb nicht geeignet, die Regenerationsfähigkeit der Erde („aktive Wiederaufladung des Erdregisters“) zu berechnen.

In einer Diplomarbeit an der ETH Zürich wurden diese Modelle validiert. Auf diese Arbeit soll im folgenden etwas näher eingegangen werde.

5.1 Aufgabenstellung der Diplomarbeit

Am Laboratorium für Energiesysteme an der ETH Zürich wurde im Sommersemester 1996 eine Diplomarbeit zum Thema "Validierung von Luft-Erdregister-Modellen" durchgeführt [Rütti-Remund 96]. Ziel der Arbeit war die theoretische Untersuchung und Validierung von verschiedenen Modellen für die Berechnung von Lufteerdregistern (LER).

Folgende LER-Modelle waren zu validieren:

- Widerstands-Kapazitätenmodell, implementiert als Pascal-Programm.
- Analytisch-dynamisches Modell für ein Rohr im unendlich ausgedehnten Erdreich.
- Analytisch-statisches Modell für eine Rohrreihe von Glück / Ghazi / Baumgartner.
- Analytisch-statisches Modell für ein Rohr von Albers.
- Heindl Matrizen.

Von den folgenden Erdregisteranlagen wurden in verdankenswerter Weise Messresultate für die Validierung zur Verfügung gestellt:

- Messprojekt Nullheizenergiehäuser in Wädenswil (Stangier / Zweifel 1995)
- Erdregister Caroubier 19 in Carouge, ERTE SA (Mermoud / Spoehrle 1996)
- Erdregister Schwerzenbacherhof (Baumgartner et al. 1993)

Alle diese Erdregister dienen der Vorwärmung der Zuluft im Winter und der Kühlung im Sommer.

Zusätzlich wurden an der Anlage "Bromberg" in Laufen (Abbildung 2-5) eigene Messungen durchgeführt.

5.2 Anlagenbeschreibung der Validierungsobjekte

Nullheizenergiehäuser in Wädenswil

Eine erste Durchsicht der Messungen hat gezeigt, dass die Resultate der Anlage Wädenswil für unsere Zwecke nicht geeignet sind. Dieses Erdregister ist so stark überdimensioniert, dass die Lufttemperaturen am Registeraustritt kaum mehr schwanken. Ausserdem befindet sich die Messstelle im Keller, wodurch die Messresultate stark beeinflusst waren. Eine sehr grosse Leckrate in der Wärmerückgewinnungsanlage wirkte sich dabei wie eine Beheizung des Kellers aus. Dadurch waren im Heizfall die gemessenen Luftaustrittstemperaturen sogar mehrfach grösser als die Erdreichtemperaturen.

Caroubier 19 in Carouge

Für unsere Zwecke bedingt brauchbar sind die Messungen der Anlage Caroubier 19 in Carouge (Abbildung 2-10). Auch diese Anlage ist relativ gross dimensioniert, so dass auch hier die Temperaturen am Luftaustritt kaum mehr schwanken. Da aber im Erdregister mehrere Messstellen angebracht waren, wurde in der Diplomarbeit ein Versuch zur Validierung mit diesen Messresultaten unternommen. Die Erdregister sind unter einer Garage angeordnet, so dass nicht die üblichen Randbedingungen angewendet werden können. Unbekannt ist ausserdem, ob alle Rohre gleichmässig durchströmt werden. Die Register waren während der Messkampagne ununterbrochen durchströmt.

Schwerzenbacherhof

Beim Schwerzenbacherhof (Abbildung 2-6) sind die Register unter dem Gebäude angebracht. Kellertemperaturen sind gemessen. Das Erdregister war während der Messkampagne nur teilweise durchströmt. Es ist nicht bekannt, ob alle Registerrohre gleichmässig durchströmt waren. Es wurde ein Versuch unternommen, dieses Erdregister nachzurechnen.

5.3 Messungen am Erdregister Bromberg in Laufen

Ein grundsätzlich anderes Anlagenkonzept liegt der Erdregisteranlage Bromberg in Laufen zu Grunde (cf. Abbildung 2-5). Das Einfamilienhaus wird monovalent mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe beheizt. Das Gebäude hat keine Lüftungsanlage. Das Erdregister dient einerseits der Vorwärmung der Luft für die Wärmepumpe, kann andererseits aber auch im Umluftbetrieb vor die Wärmepumpe geschaltet werden, wodurch die Vereisung des Verdampfers bei hoher Luftfeuchtigkeit um Null Grad herum verhindert werden kann.

Dank einer vorausschauenden Planung sind in der 1995 neu erbauten Anlage Bromberg in Laufen alle 3 Erdregisterrohre an verschiedenen Stellen für spätere Messungen ausgerüstet. Mit der guten Zugänglichkeit der einzelnen Registerrohre können in der Diplomarbeit neben den Lufttemperaturen auch die Volumenströme der einzelnen Rohre gemessen werden. Die Erdregister sind in ca. 2m Tiefe neben dem Haus im Erdreich verlegt. Eine Messtelle im Erdreich in Verlegetiefe der Rohre ist vorhanden.

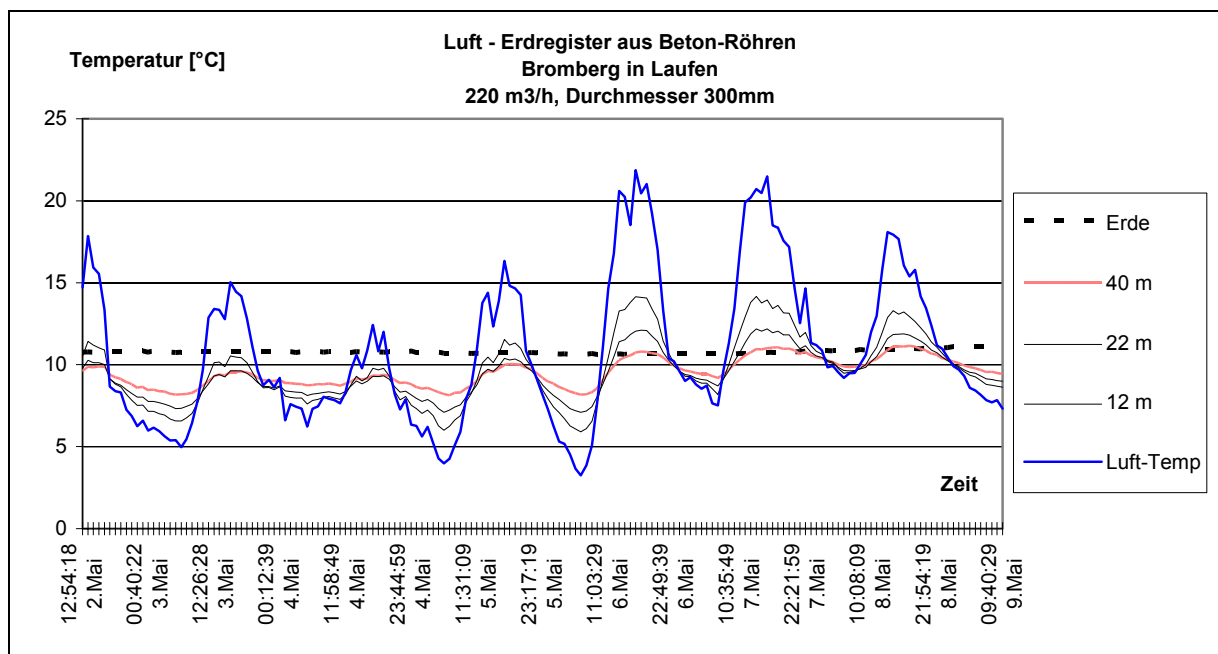


Abbildung 5-1: Messung auf der Erdregisteranlage Bromberg in Laufen (Messung Stefan Remund / Roland Rütli, 1996)

Die Messkampagne der Diplomarbeit dauerte 3 Wochen. Die Messungen waren erfolgreich und zeigten gute Resultate.

Es konnte die folgende Messreihe durchgeführt werden:

- Luftgeschwindigkeit 0.9 m/s, Messdauer 1 Woche
- Luftgeschwindigkeit 1.8 m/s, Messdauer 1 Woche
- Luftgeschwindigkeit 2.4 m/s, Messdauer 1 Woche

Es wurden die Lufttemperatur am Eintritt des Erdregisters, 3 Messungen der Lufttemperatur im Rohrquerschnitt, verteilt auf die Rohrlänge und die Luftaustritts-Temperatur gemessen. Ausserdem wurde die Temperatur des ungestörten Erdreiches in Verlegetiefe der Rohre gemessen. Mit einer Messung der Luftgeschwindigkeit in jedem der 3 Rohre wurde die gleichmässige Durchströmung der Erdregister überprüft.

5.4 Validierung des WKM-Modells

Das WKM-Modell ist in Kapitel 4 dieser Arbeit beschrieben und dokumentiert. Als Erweiterung wurde in der Diplomarbeit eine Kombination der beiden äusseren Randbedingungen (Oberflächentemperatur und ungestörtes Erdreich) vorgeschlagen, so dass damit auch Erdregister berechnet werden können, die unter einer grösseren Garage oder einem Keller des Gebäudes angeordnet sind.

Es zeigte sich, dass die Abweichungen zwischen Messungen und Rechnungen mit zunehmender Länge der Rohre kleiner werden. Als Grund werden Randeinflüsse verantwortlich gemacht, die in den Modellen nicht berücksichtigt werden.

Das Verlegen im Sandbett hat keinen signifikanten Einfluss auf die Austrittstemperatur. Dies konnte an der Anlage "Bromberg" gezeigt werden, da eine der drei Röhren im Sand eingebettet ist. Eine Parametervariation zeigt, dass die Leitfähigkeit des Erdreichs nur einen untergeordneten Einfluss auf das dynamische Verhalten des Erdregisters hat.

Messobjekt	Abweichungen
Bromberg	0.3 bis 0.5 °C
Caroubiers	0.4 bis 0.6 °C
Schwerzenbacherhof	ca. 0.7 °C

Tabelle 5-1: Mittlere Abweichungen der Modellrechnungen von den Messresultaten.

Beurteilung:

Verhalten:	Sehr gutes dynamisches Verhalten, Berechnung weicht kaum von der Messung ab. Dies ist der wirklichkeitsnahen Modellierung zu verdanken, denn das Modell beschreibt die Wärmeleitung im Rohr exakt. Auch Veränderungen des Volumenstroms werden wirklichkeitsgetreu wiedergegeben. Die Unterschiede des erweiterten Modells sind erst bei Randbedingungen gross, bei denen ein grosser Einfluss der Erdoberfläche herrscht
Randbedingungen	Können realitätsnah eingegeben werden, vor allem beim erweiterten Modell, mit zwei unterschiedlichen Randbedingungen.
Abweichungen:	Bei allen berechneten Messreihen ist nie eine mittlere Abweichung von mehr als 1°C festgestellt worden. Die Amplitudendämpfungen entsprechen den Messungen gut.
Vorteile:	Randbedingungen, Messwertverarbeitung, auch für nicht kontinuierlichen Betrieb des LER einsetzbar
Nachteile:	Hohe Empfindlichkeit auf falsch eingegebene Anfangsbedingungen, Einschwingvorgänge berücksichtigen
Beurteilung:	Bestes Modell, genau

5.5 Validierung des analytischen Modells

Das analytische Modell wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und ist im Kapitel 4 beschrieben. Es rechnet mit harmonischen Eintrittstemperaturen mit beliebiger Amplitude und Frequenz. Als Resultat erhält man eine Amplitudendämpfung und eine Phasenverschiebung der Temperatur am Erdregister-Austritt. Es können keine transienten berechnet werden, d.h. es wird immer vom eingeschwungenen Zustand ausgegangen. Das Erdregister wirkt in diesem Modell immer nur als Puffer, eine passive Regeneration (Wärmezufuhr aus dem Erdreich) muss separat berechnet und dem Resultat als Offset überlagert werden. Das analytische Modell eignet sich zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines Erdregisters, zur Grobdimensionierung und zur Ueberprüfung von numerischen Modellen.

Beurteilung:

Verhalten:	Sehr gutes dynamisches Verhalten, Berechnung weicht wenig von der Messung ab, allerdings nur für sinusförmige Eingangsgrößen. Veränderungen des Volumenstroms werden gut wiedergegeben.
Randbedingungen	Nur Verhalten in unendlich ausgedehntem Erdreich
Abweichungen:	Mittlere Abweichung von ca. 1 bis 2°C, Amplitudendämpfungen entsprechen den Messungen sehr gut.
Vorteile:	Einfaches Modell
Nachteile:	Nur sinusförmige Eingabegrößen, nur im unendlich ausgedehnten Erdreich gültig, kein Temperaturoffset berechenbar
Beurteilung:	Gutes Modell, vor allem für die Untersuchung von dynamischen Aspekten

5.6 Validierung des Ghazi/Müller-Modells

Das Müller/Ghazi-Modell wurde von Rütli/Remund (1996) entwickelt und ist ein Erweiterungsvorschlag für das analytische Modell, das zusätzlich zu diesem auch die passive Regeneration (Wärmezufuhr aus dem Erdreich) mitberücksichtigt. Der Ansatz für die passive Regeneration wurde aus einem Ansatz von Ghazi et al. (1992) abgeleitet.

Beurteilung:

Verhalten:	Sehr gutes dynamisches Verhalten, da analytisch-dynamisches Modell (cf. Kapitel 4) integriert ist. Quasistationärer Ansatz (Mitteltemperaturverlauf) berücksichtigt Temperaturoffset.
Randbedingungen	Können realitätsnah eingegeben werden
Abweichungen:	Mittlere Abweichungen von ca. 0.5 bis 1.5°C, Amplitudendämpfung entspricht den Messungen gut.
Vorteile:	Randbedingungen
Nachteile:	Empirisches Verhalten des Erdregisters muss schon etwa bekannt sein, nur sinusförmige Messverläufe
Beurteilung:	Gutes Modell

5.7 Zusammenfassung der Resultate

Die bereits vorhandenen Messdaten waren zum Teil nicht geeignet zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Modelle, da nicht alle Randbedingungen bekannt waren, oder sehr komplizierte Betriebsverhältnisse (z.B. Intervalbetrieb) herrschten. Hingegen konnten die eigenen Messungen an der Anlage "Bromberg" unter optimalen Voraussetzungen durchgeführt werden.

Die vorgegebenen Modelle wurden kritisch untersucht und zum Teil verbessert. So wurde das Widerstands-Kapazitätenmodell (WKM) erweitert, indem der Einfluss von der Aussenluft an der Erdoberfläche mit berücksichtigt wurde. Das analytische Modell aus Kapitel 4 und das Modell von Ghazi / Albers wurden kombiniert, so dass sowohl dynamische, als auch statische Einflüsse (Ghazi) berücksichtigt werden konnten.

Das WKM wurde als am geeignetsten für Modellbetrachtungen befunden, da es sehr universell einsetzbar ist und erstaunlich kleine Abweichungen gegenüber den Messdaten hat.

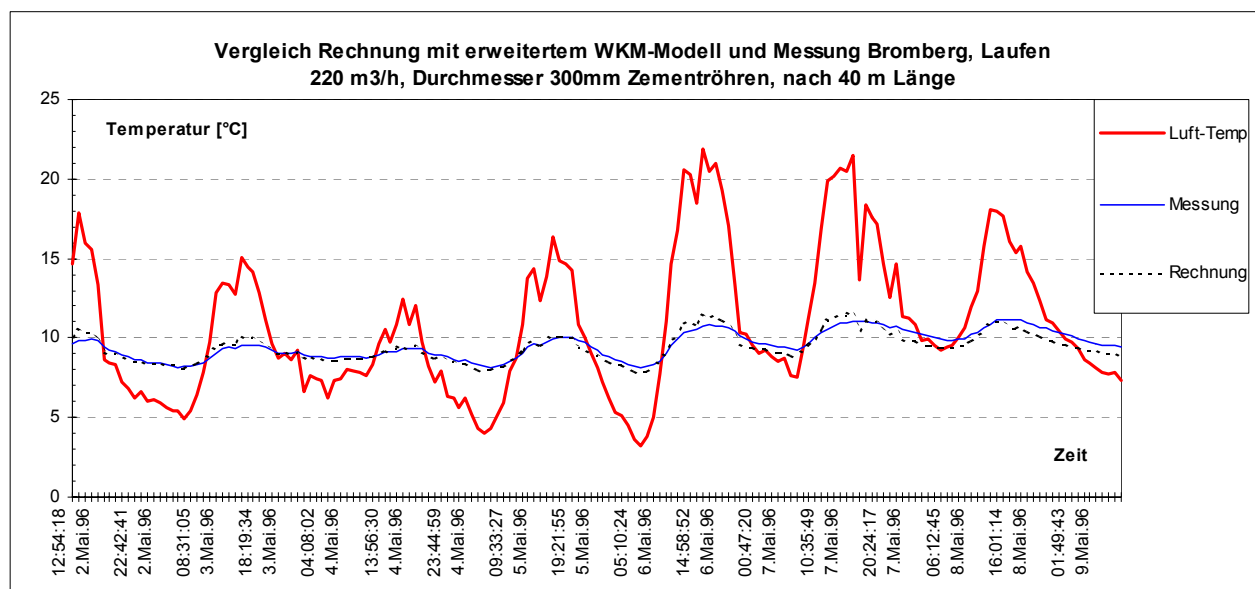


Abbildung 5-2: Vergleich Messung und Rechnung (Diplomarbeit Remund/Rütti 1996)

6 Ausblick

Dimensionierungs - Hilfsmittel für Erdregister

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Modelle lassen eine Berechnung von Erdregistern ganz unabhängig von ihrem Haupteinsatzgebiet zu (Kühlung, Vorwärmung für Lüftungsanlage, Tag-Nacht-Speicherung, Wärmequelle für Wärmepumpen). Was jetzt noch fehlt ist ein Dimensionierungs-Hilfsmittel für den Planer. Diese Forderung wurde aus unterschiedlichen Motiven auch von der Begleitgruppe dieses Projektes aufgestellt. Bei Wärmepumpen steht dabei ein knapp dimensioniertes Erdregister zur Vermeidung des Elektro-Heizstabes im Vordergrund, bei Lüftungsanlagen eine Vorwärmung und Kühlung im Sommer als Alternative zu einem aktiven Kühlaggregat. Bei all diesen Anwendungen muss der Planer eine Garantie über die Leistung des Erdregisters abgeben, was mit Hilfe eines Dimensionierungs-Tools erleichtert würde.

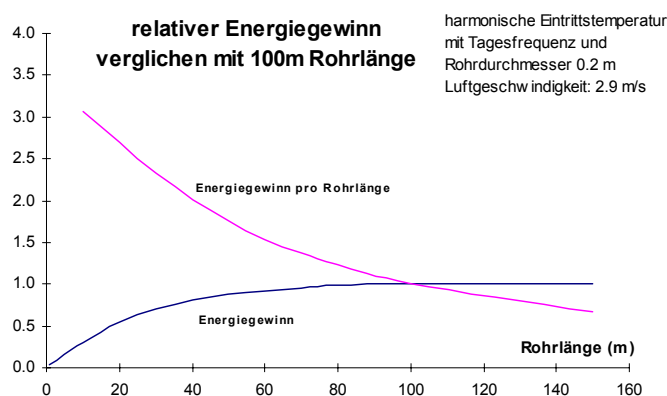


Abbildung 6-1: Oft haben knapp dimensionierte Erdregister das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis

Konstruktionsanleitung für Erdregister

Mit einfachen Standard-Konstruktionen könnten die Kosten für Erdregister noch erheblich gesenkt werden. Dies wird in verschiedenen, gebauten Erdregistern eindrücklich demonstriert. Sparpotentiale sind im Verlegebett, in der Rohrführung (Krümmer), Verlegetechnik (Schiebemuffen) und den Sammelkanälen möglich.

Systemintegration der Erdregister-Modelle

Erdregister sind nicht Selbstzweck, sondern immer Teil eines Gesamtsystems. In dieser Arbeit war die Systembetrachtung mangels Integration nur bedingt möglich. Das WKM-Modell eignet sich aber, um in Simulationsprogramme wie z.B. die Wärmepumpen-Programme YUM oder WPcalc oder in das Systemprogramm TRNSYS eingebaut zu werden.

Validierung der Erdregister - Modelle im Kollektorfall

Die Validierungsarbeit von Rütli/Remund (1996) stützte sich hauptsächlich auf Messungen, die in der Uebergangszeit gemacht wurden. Dementsprechend sind die Modelle primär für den Puffer-Fall validiert. Messungen z.B. der Sprungantwort im Winter oder Sommer über eine längere Periode im Dauerbetrieb sind zur Validierung des Kollektor-Falles nötig.

Validierung des Schotterkoffer - Modells

Das in dieser Arbeit aufgestellte Schotterkoffer-Modell ist noch nicht validiert. Eugster und Hopkirk haben 1994 Empfehlungen zum Bau von Schotterkoffern aufgestellt. Die Schotterkoffer-Modelle sollten an einer diesen Empfehlungen entsprechenden Anlage, die gegen das Erdreich gegen Wasser abgedichtet sein muss, überprüft werden.

7 Symbolverzeichnis

Lateinisches Alphabet

a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit ($\lambda/\rho c_p$)
A	m^2	Rohroberfläche der Erdregister
A	m^2	Gebäudeoberfläche
C	J/m^2K	thermische Gebäudekapazität
c, c_p	J/kgK	spezifische Wärmekapazität
d	m	Dicke eines Bauteils
D, d	m	Rohrdurchmesser
D_1	m	Verlegetiefe der Rohre, Distanz Erdoberfläche - Rohre
da	m	Aussendurchmesser Erdregisterrohre
di	m	Innendurchmesser Erdregisterrohre
dl	m	Länge eines Erdregister-Segmentes (axial)
f		Gitterfaktor, in radialer Richtung
F	m^2	Rohr - Querschnittsfläche
G	-	Gesamtenergie transmission
I	W/m^2	Strahlungsintensität
k	W/m^2K	Wärmedurchgangskoeffizient, stationär (k-Wert)
K	W/m^2K	Wärmeverlustkoeffizient (inkl. Lüftung)
L, l	m	Länge der Erdregisterrohre
L	W/K	thermische Leitfähigkeit, $1/R$
m		Anzahl Rechenknoten in radialer Richtung
n	-	Anzahl paralleler Erdregisterrohre
n	$1/h$	Luftwechselrate
P	W	Leistung
r	m	Abstand von der Rohrachse
R	K/W	thermischer Widerstand, $1/L$
S	-	bezogener Formfaktor
T	K	Temperatur
U	m	Rohrumfang
v	m/s	Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Rohr
V	m^3	Volumen
x	m	Axialkoordinate
x	g/kg	Feuchtigkeit (Wasser pro kg trockene Luft)

Griechisches Alphabet

α	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient Luft - Rohr
α_a	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient Luft-Boden über Erdregister
δ	m	Eindringtiefe einer periodischen Temperaturschwankung
ε	-	Leistungszahl einer Wärmepumpe
ε	-	Austauschgrad von Wärmetauschern
γ	m ² K/W	Gewinn-zu-Verlustverhältnis eines Gebäudes
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
π	-	Pi, 3.1415..
π	-	Kompressionsverhältnis einer Wärmepumpe
ρ	kg/m ³	Dichte
τ	h	Zeitkonstante eines Gebäudes
φ	-	relative Feuchtigkeit
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_0	°C	Temperatur an der Oberfläche über Register (z.B. Kellertemperatur)
ϑ_{out}	°C	Erdregister-Austritts-Temperatur
ϑ_{in}	°C	Erdregister-Eintritts-Temperatur

Indizes

i	Ortskoordinate, axial
j	Ortskoordinate, radial
k	Zeitkoordinate
E	Erde
L	Luft
R	Rohr
S	Schotter
t	Zeit

Kennzahlen

Bi	$\alpha D / \lambda$	Biotzahl, gebildet mit dem Rohrdurchmesser und λ Festkörper
NTU	$\frac{Ak}{\dot{V}\rho_L c_{pL}}$	Number of Exchange Heat Transfer Units
Nu	$\alpha D / \lambda$	Nusseltzahl, gebildet mit dem Rohrdurchmesser und λ Fluid
Pr	ν / a	Prandtlzahl
Re	$D v / \nu$	Reynoldszahl, gebildet mit dem Rohrdurchmesser

8 Literaturverzeichnis

- Afjei, Thomas (1989): YUM. A Yearly Utilization Model for Calculating the Seasonal Performance Factor of Electric Driven Heat Pump Heating Systems. Technical Form. Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich.
- Afjei, Th.; Wittwer, D. (1995): Yearly Utilization Model YUM WP/Holz. Benutzerhandbuch mit Beispielen. Ein Simulationsprogramm zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs und Nutzungsgrads bivalenter Wärmepumpen-Heizsysteme mit Holzkessel. INFEL und BEW.
- Afjei, Th.; Good, J.; Wittwer, D.; (1993): Klein-Wärmepumpe / Holzfeuerung bivalent. Prüfstandsversuche EPFL. NEFF-Projekt 573.
- Albers, Karl-Josef (1991): Untersuchungen zur Auslegung von Erdwärmeaustauschern für die Konditionierung der Zuluft für Wohngebäude. in: DKV, Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, 32, Stuttgart.
- Baumgartner, Thomas; Gabathuler, Hans; Szokody, Gyula (1993): Wärmepumpen. Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpen-Anlagen. RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen. EDMZ 724.356d.
- Baumgartner, Thomas; Lüthi, Rolf (1994): Ersatzluftanlage in MFH-Bau Eichrüti Hüneberg. in: EMPA-KWH, Energieforschung im Hochbau, 8. Schweiz. Status-Seminar, 291-296.
- Baumgartner, Thomas; Lüthi, Rolf; Wick, Bruno (1993): Architektur und Energiekonzept (Schwerzenbacherhof). in: SIA, Schweizer Ingenieur und Architekt, 49: 927-933.
- Baumgartner, Thomas (1996): Erdwärmennutzung für Lüftungsanlagen. Lüftungstagung 1996 des VSHL.
- Burmeister, Harald; Keller, Bruno (1995): Gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata. Schweizer Ingenieur und Architekt, Hefte 21 und 23.
- Eugster, W.J.; Hopkirk, R.J. (1994): Schotterkoffer EKZ-Filiale Regensdorf. Schlussbericht. Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW).
- Fraefel, Rudolf (1995): Dezentrale Wohnungslüftungen. Heizung Klima Nr. 9-1995.
- Fregnan, Franco; Mayer, Hans; Steinemann, Urs (1996): Lüfterdregister in trockenem Untergrund (LERT). Erfahrungen beim Bürogebäude „Stahlrain“, Brugg. 9. Schweizerisches Status-Seminar 1996. Energieforschung im Hochbau. EMPA-KWH.
- Gabathuler, H. et al. (1994): Standardschaltungen: Praxiserprobte Schaltungen für Wärmepumpen, Wärmekraftkopplung, Wärmerückgewinnung und Abwärmennutzung. RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen. EDMZ 724.359D.
- Ghazi Wakili, K.; Frank, Th.; Baumgartner, Th. (1992): Erdwärmennutzung für die Raumklimatisierung, Rechenmodell für Luft/Erdregister.
- Glück, Bernd (1990): Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren. Verlag für Bauwesen.
- Grigull U.; Sander H.: Wärmeleitung. Springer Verlag.
- Hauser; Dürr; Eberhard; Eggenberger; Ehrbar (1993): Forschungsbericht WPO. Schlussbericht Phase 2. KWF und Enfog AG.
- Huber, A.; Mösch, H. (1995): Umweltwärme effizient genutzt: Heizen mit Elektro-Wärmepumpen. Bundesamt für Konjunkturfragen und INFOENERGIE.
- Humm Othmar (1996): Das Haus als Wärmespeicher. Schweizer Ingenieur und Architekt, 26: 558-562.

-
- Kirn, Herbert (1983): Wärmepumpen, Band 5: Wärmequellen und Wärmespeicher. Karlsruhe: C. F. Müller.
- Klaiber, R; Rieder R. (1996): Messungen an drehzahlvariieren Kompressoren: spezifische elektrische Arbeit und Liefergrad eines Mitsubishi-Rollkolbenkompressors: Schlussbericht. Bundesamt für Energiewirtschaft.
- Merker, Günter (1987): Konvektive Wärmeübertragung. Springer-Verlag.
- Mermoud, André; Spoehrle, Georges (1996): Caroubiers 19 à Carouge. Mesures du puits canadien. Résultats des mesures. Rapport intermédiaire. ERTE Ingénieurs Conseils S.A., Carouge.
- Müller, Christoph; Flacher, Alexander (1994): Energiekonzept Madagaskarhalle, Semesterarbeit SS94.
- Putallaz, J.; Lachal, B.; Hollmuller, P.; Pampaloni, E. (1996): Evaluation des performances du puits canadien de l'immeuble locatif du 19 rue des caroubiers. Expertise mandatée par l'Office cantonale de l'énergie de Genève.
- Remund, Jan; Salvisberg, Esther; Kunz Stefan (1995): Meteonorm 2.01. Meteorologische Grundlagen für die Sonnenenergienutzung. Bundesamt für Energiewirtschaft BEW.
- Reist, Antoine et al. (1996): GEOSER. Stockage de chaleur, gestion de l'énergie et du climat dans les serres horticoles. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.
- Rütti, Roland; Remund, Stefan (1996): Validierung von Luft-Erdregister-Modellen. Diplomarbeit am Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich.
- Sagelsdorff, R.; Frank, T. (1990): element 29. Wärmeschutz und Energie im Hochbau. Zürich: Schweizerische Ziegelindustrie
- Sanner, Burkhard (1992): Erdgekoppelte Wärmepumpen, Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation. in: IZW-Berichte 2/92. Karlsruhe: Fachinformationszentrum.
- Stangier, Robert; Zweifel, Gerhard (1995): Messprojekt Nullheizenergiehäuser in Wädenswil. NEFF-Schlussbericht 414.1. EMPA, Dübendorf.
- Trümper, H.; Albers, K-J.; Hain, K. (1994): Energy Savings by Balanced Ventilation with Heat Recovery and Ground Heat Exchanger. in: 13th AIVC Conference, Ventilation for Energy Efficiency and Optimum Indoor Air Quality, 321-332. Nice, France.
- Zimmermann, M. et al. (1994): Rationelle Energienutzung in Gebäuden, Jahresberichte der Projektleiter. BEW.

9 Anhang

9.1 Grobanalyse der Kosten-Nutzen-Betrachtung

A) Konventionelles Einfamilienhaus

- Erdsondenanlage mit hydraulischem Verteilsystem
- Erdregisteranlage mit hydraulischem Verteilsystem
- Schotterkofferanlage mit hydraulischem Verteilsystem
- Erdsondenanlage mit Luftheizung
- Erdregisteranlage mit Luftheizung
- Schotterkofferanlage mit Luftheizung

B) Niedrigenergie-Einfamilienhaus

- Erdsondenanlage mit hydraulischem Verteilsystem
- Erdregisteranlage mit hydraulischem Verteilsystem
- Schotterkofferanlage mit hydraulischem Verteilsystem
- Erdsondenanlage mit Luftheizung
- Erdregisteranlage mit Luftheizung
- Schotterkofferanlage mit Luftheizung

C) Mehrfamilienhaus

- Erdsondenanlage mit hydraulischem Verteilsystem
- Erdregisteranlage mit hydraulischem Verteilsystem
- Schotterkofferanlage mit hydraulischem Verteilsystem

Erdsonden-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in konventionellem EFH

Kenndaten der Anlage

				Quelle
Gesamtsystem	Wärmequelle Schema Typ Betriebsart Brauchwassererwärmung	Erdsonde 60 monovalent Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		IGJ
Klima	Höhenlage Heizgradtage 12/20 Heiztage	450 müM 3'500 K d/a 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp Lage Bewohner / Benutzer Bauart Heizenergiebedarf Energiebedarf Warmwasser Beheizte Bruttogeschossfläche Wärmeleistungsbedarf Heizung Auslegungstemperatur Raumtemperatur Gewinn/Verlust-Verhältnis Zeitkonstante Energieanteil Warmwasser	Einfamilienhaus freistehend 4 Pers konventionell Qh 425 MJ/m2.a Qww 60 MJ/m2.a EBF 150 m2 9.0 kW Ta -8 °C Ti 20 °C γ 0.11 - τ 78 h ω 0.12	Qww/(Qww+Qh)	SIA 380/1 SIA 380/1 Annahme Annahme Schätzung Schätzung SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe Vorlaufemp. (Auslegung) Rücklaufemp. (Auslegung) Wärmenutzungsgrad	Radiatoren TV 50 °C TR 40 °C η1 0.90 -		Planung Planung Annahme
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer Temperatur Warmwasser Vorwärmung mit WP Normalverbrauch pro Person Leistung Elektro-Einsatz Ladezeit durchschnittlich (100% elektro) Betriebsstunden Wärmepumpe für WW Betriebsstunden Elektro-Einsatz Wirkungsgrad Warmwasseranlage	300 l 60 °C 45 °C 34.5 l/d.Pers 0.8 kW 10.1 h/d 187 h/a 1'103 h/a η2 0.85 -	10 °C kalt	Annahme Annahme
Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP installierte Leistung S0/W50 Leistungsziffer S0/W50 Jahresarbeitszahl Technischer Speicher Nennleistungs-Betriebsstunden Heizung	10.0 kW 11.0 kW 3.3 2.8 500 l 1'789 h/a		AWP + 10% IGJ RAVEL Dimens.
Wärmequellenanlage	Typ Kälteleistung WP S0/W35 Gesamtbetriebsstd. WP auf Nennleistung Jährlicher Energieentzug aus Erdreich Sondenlänge total	Erdsonden (Duplex) 8.5 kW 1976 h/a 16800 kWh 170 m	0.050 kW/m 130 kWh/m	AWP AWP EKZ Töss

Anlagekosten

Vorgaben	Realzins	p	2%	Annahme
Kosten pro Meter Sonde	143 Fr./m	für 170 m		IGJ

Investitionen	Investitions-kosten [Fr.]	Amorti-sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]		
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 24'371	40	3.7%	Fr. 891	IGJ
TOTAL		<u>Fr. 49'371</u>			<u>Fr. 2'849</u>	

Betriebskosten	Investitions-kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer	Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe	Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmequellenanlage	Fr. 24'371	1.5%	Fr. 366	VSSH SI
TOTAL			<u>Fr. 1'266</u>	

Energieverbrauch	Installierte Leistung [W]	Nennleistungs-Betriebsstunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf		
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP	3'915	187	733 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	3'915	1789	7'002 kWh	SIA 380/1
TOTAL				<u>8'617 kWh</u>	

Jahreskosten	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 4'114
Kapital		
Energie	Elektrizität	8'617 kWh

Erdregister-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in konventionellem EFH

Kenndaten der Anlage

				Quelle
Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft - Erdregister		
	Schema Typ	1	IGJ	
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 mÜM		
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a		
	Heiztage	HT 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	4 Pers		
	Bauart	konventionell		
	Heizenergiebedarf	Qh 425 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 60 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2	Annahme	
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	9.0 kW	60 W/m2	Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C		
	Raumtemperatur	Ti 20 °C		
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0,11 -	Schätzung	
	Zeitkonstante	τ 78 h	Schätzung	
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.12	Qww/(Qww+Qh)	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Radiatoren		
	Vorlauftemp. (Auslegung)	Tv 50 °C	Planung	
	Rücklauftemp. (Auslegung)	Tr 40 °C	Planung	
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.90 -	Annahme	
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme	
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt	Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C		
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers		
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW		
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.1 h/d		
	Betriebsstunden Wärmepumpe	187 h/a		
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a		
	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2 0.85 -		
Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP	10.0 kW	AWP	
	installierte Leistung A-2/W50	11.0 kW		
	Leistungsziffer A5/W50	COPw 2.9	IGJ	
	Winterarbeitszahl	WAZ 2.4	COP-0.5	RAVEL
	Leistungsziffer A15/W50	COPs 3.5	IGJ	
	Sommerarbeitszahl (Warmwasser)	SAZ 3.0	COP-0.5	RAVEL
	Technischer Speicher	500 l	2 Schalt/h	Dimens.
	Nennleistungs-Betriebsstunden	1'789 h/a		
Wärmequellenanlage	Typ	Lufterdregister		
	Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C	10.0 kW	EKZ Töss	
	Luftvolumen Wärmepumpe	4'000 m3/h	Hoval	
	Länge der Rohre	40 m		
	Anzahl parallele Rohre	6 -		
	Luftgeschwindigkeit	5.9 m/s		
	Durchmesser der Rohre	200 mm		
	Rohrmaterial	PVC	15 Fr/m	Spreng
	Rohrinnenoberfläche	151 m2		

Anlagekosten

				Quelle
Vorgaben	Realzins	p 2%		
	Kosten pro m2 Erdregister	189 Fr./m2	für 151 m2	Annahme IGJ

		Investitions-	Amorti-	Annuität	Jährliche	
		kosten	sation		Kapitalkosten	
		[Fr.]	[Jahre]		[Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung, Elektro komplett	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmequellenanlage		Fr. 28'454	40	3.7%	Fr. 1'040	IGJ
TOTAL		<u>Fr. 53'454</u>			<u>Fr. 2'998</u>	

		Investitions-	Index	Jährliche	
		kosten	Unterhalt	Unterhaltskosten	
		[Fr.]		[Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmequellenanlage		Fr. 28'454	1.5%	Fr. 427	VSSH SI
TOTAL				<u>Fr. 1'327</u>	

		Installierte	Nennleistungs-	Elektrischer	
		Leistung	Betriebsstunden	Energiebedarf	
		[W]	[h/a]		
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP Winter	4'593	113	518 kWh	
	WP Sommer	3'636	74	270 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	4'593	1789	8'215 kWh	SIA 380/1
TOTAL				<u>9'886 kWh</u>	

Jahreskosten			
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)		Fr. 4'325
Energie	Elektrizität		9'886 kWh

Schotterkoffer-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in konventionellem EFH

Kenndaten der Anlage

		Quelle	
Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft / Schotterkoffer	
	Schema Typ	1	IGJ
	Betriebsart	monovalent	
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz	
Klima	Höhenlage	450 müM	
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a	
	Heiztage	HT 220 d/a	
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus	
	Lage	freistehend	
	Bewohner / Benutzer	4 Pers	
	Bauart	konventionell	
	Heizenergiebedarf	Qh 425 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 60 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2	Annahme
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	9.0 kW	60 W/m2 Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C	
	Raumtemperatur	Ti 20 °C	
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0.11 -	Schätzung
	Zeitkonstante	τ 78 h	Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.12	Qww/(Qww+Qh) SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Radiatoren	
	Vorlaufemp. (Auslegung)	Tv 50 °C	Planung
	Rücklaufemp. (Auslegung)	TR 40 °C	Planung
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.90 -	Annahme
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C	
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers	
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW	
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.1 h/d	
	Betriebsstunden Wärmepumpe	187 h/a	
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a	
	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2 0.85 -	
	Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP	10.0 kW
installierte Leistung A-2/W50		11.0 kW	EKZ Töss
Leistungsziffer A5/W50		COPw 2.9	IGJ
Winterarbeitszahl		WAZ 2.4	COP-0.5 RAVEL
Leistungsziffer A15/W50		COPs 3.5	IGJ
Sommerarbeitszahl (Warmwasser)		SAZ 3.0	COP-0.5 RAVEL
Technischer Speicher		500 l	2 Schall/h Dimens.
Nennleistungs-Betriebsstunden		1'789 h/a	
Wärmequellenanlage	Typ	Schotterkoffer	
	Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C	10.0 kW	
	Gesamtvolumen Schotterkoffer	50 m3	5.0 m3/kW EKZ/TIA

Anlagekosten

		Quelle	
Vorgaben	Realzins	p 2%	
	Kosten pro m3 Schotterkoffer	250 Fr./m3	für 50 m3 Annahme IGJ

Investitionen		Investitions- kosten [Fr.]	Amorti- sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 12'500	40	3.7%	Fr. 457	IGJ
TOTAL		Fr. 37'500			Fr. 2'415	

Betriebskosten		Investitions- kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmequellenanlage		Fr. 12'500	1.5%	Fr. 188	VSSH SI
TOTAL				Fr. 1'088	

Energieverbrauch		Installierte Leistung [W]	Nennleistungs- Betriebsstunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP Winter	4'593	113	518 kWh	
	WP Sommer	3'636	74	270 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	4'593	1789	8'215 kWh	SIA 380/1
TOTAL				9'886 kWh	

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 3'502
Energie	Elektrizität	9'886 kWh

Erdsonden-Anlage mit Luftheizung in konventionellem EFH

Kenndaten der Anlage

		Quelle	
Gesamtsystem	Wärmequelle	Erdsonde	
	Schema Typ	64	IGJ
	Betriebsart	monovalent	
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz	
Klima	Höhenlage	450 müM	
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a	
	Heiztage	HT 220 d/a	
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus	
	Lage	freistehend	
	Bewohner / Benutzer	4 Pers	
	Bauart	konventionell	
	Heizenergiebedarf	Qh 425 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 60 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2	Annahme
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	8.1 kW	54 W/m2 Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C	
	Raumtemperatur	Ti 20 °C	
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0.11 -	Schätzung
	Zeitkonstante	τ 78 h	Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.12	Qww/(Qww+Qh) SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Luftheizung (ohne statisches Heizsystem)	
	Zulufttemperatur	TZUL 45 °C	
	Ablufttemperatur	TABL 20 °C	
	Vorlauftemp. (Auslegung)	Tv 50 °C	Planung
	Rücklauftemp. (Auslegung)	Tr 40 °C	Planung
	Energierückgewinn WRG	42.5 MJ/m2.a	10% von Qh
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.90 -	Annahme
	Luftmenge	1'080 m3/h	Planung
Raumluftwechsel	2.9 1/h	2.5 m Raumhöhe	
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C	
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers	
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW	
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.1 h/d	
	Betriebsstunden Wärmepumpe	208 h/a	
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a	
Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP	9.0 kW	AWP
	installierte Leistung S0/W50	9.9 kW	+ 10%
	Leistungsziffer S0/W50	3.3	IGJ
	Jahresarbeitszahl	JAZ 2.8	COP-0.5 RAVEL
Technischer Speicher	450 l	2 Schalt/h Dimens.	
Nennleistungs-Betriebsstunden Heizung	1'789 h/a		
Wärmequellenanlage	Typ	Erdsonden (Duplex)	
	Kälteleistung WP S0/W35	7.7 kW	Leist. 0/50 + 20% EKZ Töss
	Gesamtbetriebsstd. WP auf Nennleistung	1997 h/a	
	Jährlicher Energieentzug aus Erdreich	15279 kWh	
	Sondenlänge total	153 m	0.050 kW/m AWP bzw. 130 kWh/m AWP

Anlagekosten

		Quelle	
Vorgaben	Realzins	p 2%	Annahme
	Kosten pro Meter Sonde	149 Fr./m	für 153 m IGJ

Investitionen		Investitions- kosten [Fr.]	Amorti- sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmenutzungsanlage	Kosten Luftheizg. (WRG) - Kosten stat. Heizung	Fr. 0	15	7.8%	Fr. 0	
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 22'801	40	3.7%	Fr. 834	IGJ
TOTAL		Fr. 47'801			Fr. 2'791	

Betriebskosten		Investitions- kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage		Fr. 0	5.0%	Fr. 0	SIA 380/2
Wärmequellenanlage		Fr. 22'801	1.5%	Fr. 342	VSSH SI
TOTAL				Fr. 1'242	

Energieverbrauch		Installierte Leistung [W]	Betriebs- stunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP Winter	3'523	125	442 kWh	
	WP Sommer	3'523	83	291 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	3'523	1789	6'302 kWh	SIA 380/1
TOTAL				7'917 kWh	

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 4'033
Energie	Elektrizität	7'917 kWh

Erdregister-Anlage mit Luftheizung in konventionellem EFH

Kenndaten der Anlage

				Quelle
Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft - Erdregister		
	Schema Typ	34	IGJ	
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 müM		
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a		
	Heiztage	HT 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	4 Pers		
	Bauart	konventionell		
	Heizenergiebedarf	Qh 425 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Anteil Sonne an Wärmeenergiebedarf	27%		
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2	Annahme	
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	8.1 kW	54 W/m2	Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C		
	Raumtemperatur	Ti 20 °C		
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0.11 -		Schätzung
	Zeitkonstante	τ 78 h		Schätzung
Energieanteil Warmwasser	ω 0.12	Q _{ww} /(Q _{ww} +Q _h)	SIA 380/1	
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Luftheizung (ohne statisches Heizsystem)		
	Zulufttemperatur	TZUL 45 °C		
	Ablufttemperatur	TABL 20 °C		
	Vorlauftemp. (Auslegung)	Tv 50 °C	Planung	
	Rücklauftemp. (Auslegung)	TR 40 °C	Planung	
	Energierückgewinn WRG	42.5 MJ/m2.a	10% von Qh	
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.90 -	Annahme	
	Luftmenge	1'080 m3/h	Planung	
	Raumluftwechsel	2.9 1/h	2.5 m Raumhöhe	
	Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme
Temperatur Warmwasser		60 °C	10 °C kalt	Annahme
Vorwärmung mit WP		45 °C		
Normalverbrauch pro Person		34.5 l/d.Pers		
Ladezeit Brauchwasser maximal		25.7 h		
Leistung Elektro-Einsatz		0.8 kW		
Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)		10.1 h/d		
Betriebsstunden Elektro-Einsatz		1'103 h/a		
Wirkungsgrad Warmwasseranlage		η2 0.85 -		
Wärmepumpe		benötigte Kondensatorleistung WP	9.0 kW	AWP
	installierte Leistung A-2/W50	9.9 kW	+ 10% EKZ Töss	
	Leistungsziffer A5/W50	COPw 2.9	IGJ	
	Winterarbeitszahl	WAZ 2.4	COP-0.5	RAVEL
	Leistungsziffer A5/W35	COPw1 3.7	IGJ	
	Winterarbeitszahl Heizung	WAZ1 3.2	COP-0.5	RAVEL
	Leistungsziffer A5/W50	COPw2 2.9	IGJ	
	Winterarbeitszahl Warmwasser	WAZ2 2.4	COP-0.5	RAVEL
Wärmequellenanlage	Typ	Lufterdregister		
	Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C	9.0 kW	EKZ Töss	
	Luftvolumen Wärmepumpe	4'000 m3/h	Hoval	
	Länge der Rohre	40 m	Planung	
	Anzahl parallele Rohre	6 -	Planung	
	Durchmesser der Rohre	200 mm		
	Luftgeschwindigkeit	5.9 m/s		
	Rohrmaterial	PVC	15 Fr/m	Spreng
	Rohrinnenoberfläche	151 m2		

Anlagekosten

Vorgaben	Realzins	p	2%		Annahme
Kosten pro m2 Erdregister			189 Fr./m2	für 151 m2	IGJ

Investitionen	Investitions-kosten [Fr.]	Amorti-sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung, Elektro Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmenutzungsanlage	Kosten Luftheizg. (WRG) - Kosten stat. Heizung Fr. 0	15	7.8%	Fr. 0	
Wärmequellenanlage	komplett Fr. 28'454	40	3.7%	Fr. 1'040	IGJ
TOTAL	Fr. 53'454			Fr. 2'998	

Betriebskosten	Investitions-kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer	Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe	Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Fr. 0	5.0%	Fr. 0	SIA 380/2
Wärmequellenanlage	Fr. 28'454	1.5%	Fr. 427	VSSH SI
TOTAL			Fr. 1'327	

Energieverbrauch	Installierte Leistung [W]	Betriebs-stunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz 800	1103	882 kWh	VSSH
	WP Winter 4'134	125	518 kWh	
	WP Sommer 3'273	83	270 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP 3'093	1789	5'532 kWh	SIA 380/1
TOTAL			7'203 kWh	

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 4'325
Energie	Elektrizität	7'203 kWh

Schotterkoffer-Anlage mit Luftheizung in konventionellem EFH

Kenndaten der Anlage

		Quelle		
Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft / Schotterkoffer		
	Schema Typ	34	IGJ	
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 müM		
	Heizgradtage 12/20	HGT	3'500 K d/a	
	Heiztage	HT	220 d/a	
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	4 Pers		
	Bauart	konventionell		
	Heizenergiebedarf	Qh	425 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Energiebedarf Warmwasser	Qww	60 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF	150 m2	Annahme
	Wärmeleistungsbedarf Heizung		8.1 kW	54 W/m2 Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta	-8 °C	
	Raumtemperatur	Ti	20 °C	
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ	0.11 -	Schätzung
	Zeitkonstante	τ	78 h	Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω	0.12	Qww/(Qww+Qh) SIA 380/1
	Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Luftheizung (ohne statisches Heizsystem)	
Zulufttemperatur		TZUL	45 °C	
Ablufttemperatur		TABL	20 °C	
Vorlauftemp. (Auslegung)		TV	50 °C	Planung
Rücklauftemp. (Auslegung)		TR	40 °C	Planung
Energierückgewinn WRG			42.5 MJ/m2.a	10% von Qh
Wärmenutzungsgrad		η1	0.90 -	Annahme
Luftmenge			1'080 m3/h	Planung
Raumluftwechsel			2.9 1/h	2.5 m Raumhöhe
Brauchwassererwärmer		Grösse Wassererwärmer	300 l	
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt Annahme	
	Vorwärmung mit WP	45 °C		
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers		
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW		
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.1 h/d		
	Betriebsstunden Wärmepumpe	208 h/a		
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a		
Wärmepumpe	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2	0.85 -	
	benötigte Kondensatorleistung WP	9.0 kW		
	installierte Leistung A-2/W50	9.9 kW		
	Leistungsziffer A5/W50	COPw	2.9	AWP
	Winterarbeitszahl	WAZ	2.4	+ 10% EKZ Töss
	Leistungsziffer A15/W50	COPs	3.5	IGJ
	Sommerarbeitszahl (Warmwasser)	SAZ	3.0	COP-0.5 RAVEL
	Technischer Speicher	450 l		
Betriebsstunden	1'789 h/a			
Wärmequellenanlage	Typ	Schotterkoffer		
	Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C	9.0 kW		
	Gesamtvolumen Schotterkoffer	45 m3	5.0 m3/kW EKZ/11A	

Anlagekosten

		Quelle	
Vorgaben	Realzins	p	2%
	Kosten pro m3 Schotterkoffer		260 Fr./m3 für 45 m3 Annahme IGJ

Investitionen		Investitions- kosten [Fr.]	Amorti- sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung, Elektro	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmenutzungsanlage	Kosten Luftheizg. (WRG) - Kosten stat. Heizung	Fr. 0	15	7.8%	Fr. 0	
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 11'700	40	3.7%	Fr. 428	IGJ
TOTAL		<u>Fr. 36'700</u>			<u>Fr. 2'386</u>	

Betriebskosten		Investitions- kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage		Fr. 0	5.0%	Fr. 0	SIA 380/2
Wärmequellenanlage		Fr. 11'700	1.5%	Fr. 176	VSSH SI
TOTAL				<u>Fr. 1'076</u>	

Energieverbrauch		Installierte Leistung [W]	Betriebs- stunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP Winter	4'134	125	518 kWh	
	WP Sommer	3'273	83	270 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	3'093	1789	5'532 kWh	SIA 380/1
TOTAL				<u>7'203 kWh</u>	

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 3'461
Energie	Elektrizität	7'203 kWh

Erdsonden-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in Niedrigenergie - EFH

Kenndaten der Anlage

				Quelle
Gesamtsystem	Wärmequelle	Erdsonde		
	Schema Typ	60		IGJ
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 müM		
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a		
	Heiztage	HT 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	4 Pers		
	Bauart	Niedrigenergiehaus		
	Heizenergiebedarf	Qh 120 MJ/m2.a		SIA 380/1
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 60 MJ/m2.a		SIA 380/1
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2		Annahme
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	3.8 kW	25 W/m2	Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C		Schätzung
	Raumtemperatur	Ti 20 °C		Schätzung
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0.11 -		Schätzung
	Zeitkonstante	τ 78 h		Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.33	Qww/(Qww+Qh)	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Fussbodenheizung		
	Vorlaufemp. (Auslegung)	TV 35 °C		Planung
	Rücklaufemp. (Auslegung)	TR 25 °C		Planung
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.95 -		Annahme
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l		Annahme
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt	Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C		
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers		
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW		
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.7 h/d		
	Betriebsstunden Wärmepumpe	474 h/a		
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a		
Wärmepumpe	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2 0.85 -		
	benötigte Kondensatorleistung WP	3.9 kW		AWP
	installierte Leistung S0/W35	4.3 kW	+ 10%	
	Leistungsziffer S0/W35	COP 4.7		IGJ
	Jahresarbeitszahl	JAZ 4.2	COP-0.5	RAVEL
	Leistungsziffer S0/W50	COP2 3.3		IGJ
	Jahresarbeitszahl WW	JAZ2 2.8	COP-0.5	RAVEL
	Technischer Speicher	200 l	2 Schalt/h	Dimens.
	Nennleistungs-Betriebsstunden	1'212 h/a		
	Wärmequellenanlage	Typ	Erdsonden (Duplex)	
Kälteleistung WP S0/W35		3.3 kW		EKZ Töss
Gesamtbetriebsstd. WP auf Nennleistung		1686 h/a		
Jährlicher Energieentzug aus Erdreich		5591 kWh		
Sondenlänge total		66 m	0.050 kW/m	AWP
		bzw. 130 kWh/m	AWP	

Anlagekosten

					Quelle
Vorgaben	Realzins	p	2%		
	Kosten pro Meter Sonde		178 Fr./m	für 66 m	Annahme IGJ

Investitionen		Investitions-kosten [Fr.]	Amorti-sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 11'797	40	3.7%	Fr. 431	IGJ
TOTAL		Fr. 36'797			Fr. 2'389	

Betriebskosten		Investitions-kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmequellenanlage		Fr. 11'797	1.5%	Fr. 177	VSSH SI
TOTAL				Fr. 1'077	

Energieverbrauch		Installierte Leistung [W]	Nennleistungs-Betriebsstunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP	1'545	474	733 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	1'027	1212	1'244 kWh	SIA 380/1
TOTAL				2'859 kWh	

Jahreskosten			
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)		Fr. 3'466
Energie	Elektrizität		2'859 kWh

Erdregister-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in Niedrigenergie - EFH

Kenndaten der Anlage

		Quelle	
Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft - Erdregister	
	Schema Typ	1	IGJ
	Betriebsart	monovalent	
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz	
Klima	Höhenlage	450 müM	
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a	
	Heiztage	HT 220 d/a	
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus	
	Lage	freistehend	
	Bewohner / Benutzer	4 Pers	
	Bauart	Niedrigenergiehaus	
	Heizenergiebedarf	Qh 120 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Anteil Sonne an Wärmeenergiebedarf	56%	
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2	Annahme
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	3.8 kW	25 W/m2 Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C	
	Raumtemperatur	Ti 20 °C	
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ -	Schätzung
	Zeitkonstante	τ h	Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.33	Q _{ww} /(Q _{ww} +Q _h) SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Fussbodenheizung	
	Vorlauftemp. (Auslegung)	Tv 35 °C	Planung
	Rücklauftemp. (Auslegung)	Tr 25 °C	Planung
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.95 -	Annahme
	Umwälzpumpe Wärmeabgabe	80 W	Annahme
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C	
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers	
	Ladezeit Brauchwasser maximal	25.7 h	
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW	
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.1 h/d	
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a	
	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2 0.85 -	
	Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP	3.9 kW
installierte Leistung A-2/W35		4.3 kW	EKZ Töss
Leistungsziffer A5/W35		COPw1 3.7	IGJ
Winterarbeitszahl Heizung		WAZ1 3.2	COP-0.5 RAVEL
Leistungsziffer A5/W50		COPw2 2.9	IGJ
Winterarbeitszahl Warmwasser		WAZ2 2.4	COP-0.5 RAVEL
Leistungsziffer A15/W50		COPs 3.5	IGJ
Sommerarbeitszahl (Warmwasser)		SAZ 3.0	COP-0.5 RAVEL
Technischer Speicher		200 l	2 Schalt/h Dimens.
Nennleistungs-Betriebsstunden		1'212 h/a	
Wärmequellenanlage		Typ	Lufterdregister
	Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C	3.9 kW	EKZ Töss
	Luftvolumen Wärmepumpe	2'000 m3/h	Siemens
	Länge der Rohre	40 m	
	Anzahl parallele Rohre	3 -	
	Luftgeschwindigkeit	5.9 m/s	
	Durchmesser der Rohre	200 mm	
	Rohrmaterial	PVC	15 Fr/m Spreng
Rohrinnenoberfläche	75 m2		

Anlagekosten

		Quelle	
Vorgaben	Realzins	p 2%	
	Kosten pro m2 Erdregister	194 Fr./m2	für 75 m2 Annahme IGJ

		Investitions-kosten [Fr.]	Amorti-sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung, Elektro komplett	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmequellenanlage		Fr. 14'653	40	3.7%	Fr. 536	
TOTAL		<u>Fr. 39'653</u>			<u>Fr. 2'493</u>	

		Investitions-kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmequellenanlage		Fr. 14'653	1.5%	Fr. 220	VSSH SI
TOTAL				<u>Fr. 1'120</u>	

		Installierte Leistung [W]	Nennleistungs-Betriebsstunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP Winter	1'813	286	518 kWh	
Wärmepumpe	WP Sommer	1'435	188	270 kWh	
	Betriebsenergie WP	1'356	1212	1'644 kWh	SIA 380/1
TOTAL				<u>3'315 kWh</u>	

		Quelle	
Jahreskosten			
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)		Fr. 3'613
Energie	Elektrizität		3'315 kWh

Schotterkoffer-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in Niedrigenergie - EFH

Kenndaten der Anlage

		Quelle	
Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft / Schotterkoffer	
	Schema Typ	1	IGJ
	Betriebsart	monovalent	
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz	
Klima	Höhenlage	450 müM	
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a	
	Heiztage	HT 220 d/a	
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus	
	Lage	freistehend	
	Bewohner / Benutzer	4 Pers	
	Bauart	Niedrigenergiehaus	
	Heizenergiebedarf	Qh 120 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 60 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2	Annahme
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	3.8 kW	25 W/m2 Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C	
	Raumtemperatur	Ti 20 °C	
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ -	Schätzung
	Zeitkonstante	τ h	Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.33	Qww/(Qww+Qh) SIA 380/1
	Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Fussbodenheizung
Vorlaufemp. (Auslegung)		TV 35 °C	Planung
Rücklaufemp. (Auslegung)		TR 25 °C	Planung
Wärmenutzungsgrad		η1 0.95 -	Annahme
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C	
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers	
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW	
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.1 h/d	
	Betriebsstunden Wärmepumpe	474 h/a	
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a	
	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2 0.85 -	
	Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP	3.9 kW
installierte Leistung A-2/W35		4.3 kW	EKZ Töss
Leistungsziffer A5/W35		COPw1 3.7	IGJ
Winterarbeitszahl Heizung		WAZ1 3.2	COP-0.5 RAVEL
Leistungsziffer A5/W50		COPw2 2.9	IGJ
Winterarbeitszahl Warmwasser		WAZ2 2.4	COP-0.5 RAVEL
Leistungsziffer A15/W50		COPs 3.5	IGJ
Sommerarbeitszahl (Warmwasser)		SAZ 3.0	COP-0.5 RAVEL
Technischer Speicher		200 l	2 Schalt/h Dimens.
Nennleistungs-Betriebsstunden		1'212 h/a	
Wärmequellenanlage		Typ	Schotterkoffer
	Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C	3.9 kW	
	Gesamtvolumen Schotterkoffer	20 m3	5.0 m3/kW EKZ/11A

Anlagekosten

		Quelle	
Vorgaben	Realzins p	2%	Annahme
	Kosten pro m3 Schotterkoffer	311 Fr./m3	für 20 m3 IGJ

Investitionen		Investitions-kosten [Fr.]	Amorti-sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 6'129	40	3.7%	Fr. 224	
TOTAL		<u>Fr. 31'129</u>			<u>Fr. 2'182</u>	

Betriebskosten		Investitions-kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmequellenanlage		Fr. 6'129	1.5%	Fr. 92	VSSH SI
TOTAL				<u>Fr. 992</u>	

Energieverbrauch		Installierte Leistung [W]	Nennleistungs-Betriebsstunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP Winter	1'813	286	518 kWh	
	WP Sommer	1'435	188	270 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	1'356	1212	1'644 kWh	SIA 380/1
TOTAL				<u>3'315 kWh</u>	

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 3'174
Energie	Elektrizität	3'315 kWh

Erdsonden-Anlage mit Luftheizung in Niedrigenergie - EFH

Kenndaten der Anlage

				Quelle
Gesamtsystem	Wärmequelle	Erdsonde		
	Schema Typ	64	IGJ	
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 müM		
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a		
	Heiztage	HT 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	4 Pers		
	Bauart	Niedrigenergiehaus		
	Heizenergiebedarf	Qh 120 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 60 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2	Annahme	
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	2.6 kW	18 W/m2	Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C		
	Raumtemperatur	Ti 20 °C		
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0,11 -	Schätzung	
	Zeitkonstante	τ 78 h	Schätzung	
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.33	Qww/(Qww+Qh)	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Luftheizung (ohne statisches Heizsystem)		
	Zulufttemperatur	TZUL 30 °C		
	Ablufttemperatur	TABL 20 °C		
	Vorlauftemp. (Auslegung)	Tv 35 °C	Planung	
	Rücklauftemp. (Auslegung)	Tr 25 °C	Planung	
	Energierückgewinn WRG	36 MJ/m2.a	30% von Qh	
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.95 -	Annahme	
	Luftmenge	829 m3/h	Planung	
	Raumluftwechsel	2.2 1/h	2.5 m Raumhöhe	
	Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme
Temperatur Warmwasser		60 °C	10 °C kalt	Annahme
Vorwärmung mit WP		45 °C		
Normalverbrauch pro Person		34.5 l/d.Pers		
Leistung Elektro-Einsatz		0.8 kW		
Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)		10.1 h/d		
Betriebsstunden Wärmepumpe		677 h/a		
Betriebsstunden Elektro-Einsatz		1'103 h/a		
Wirkungsgrad Warmwasseranlage		η2 0.85 -		
Wärmepumpe		benötigte Kondensatorleistung WP	2.8 kW	AWP
	installierte Leistung S0/W35	3.0 kW	+10%	
	Leistungsziffer S0/W35	COP 4.7	IGJ	
	Jahresarbeitszahl	JAZ 4.2	COP-0.5	RAVEL
	Leistungsziffer S0/W50	COP2 3.3	IGJ	
	Jahresarbeitszahl WW	JAZ2 2.8	COP-0.5	RAVEL
	Technischer Speicher	150 l	2 Schalth	Dimens.
	Nennleistungs-Betriebsstunden	1'212 h/a		
Wärmequellenanlage	Typ	Erdsonden (Duplex)		
	Kälteleistung WP S0/W35	2.3 kW	EKZ Töss	
	Gesamtbetriebsstd. WP auf Nennleistung	1889 h/a		
	Jährlicher Energieentzug aus Erdreich	4385 kWh		
	Sondenlänge total	46 m	0.050 kW/m	AWP
		bzw. 130 kWh/m	AWP	

Anlagekosten

Vorgaben	Realzins	p	2%	Annahme
Kosten pro Meter Sonde			185 Fr./m	IGJ
			für 46 m	

Investitionen	Investitions-kosten [Fr.]	Amorti-sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]		
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmenutzungsanlage	Kosten Luftheizg. (WRG) - Kosten stat. Heizung	Fr. 0	15	7.8%	Fr. 0	
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 8'565	40	3.7%	Fr. 313	IGJ
TOTAL		<u>Fr. 33'565</u>			<u>Fr. 2'271</u>	

Betriebskosten	Investitions-kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer	Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe	Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Fr. 0	5.0%	Fr. 0	SIA 380/2
Wärmequellenanlage	Fr. 8'565	1.5%	Fr. 128	VSSH SI
TOTAL			<u>Fr. 1'028</u>	

Energieverbrauch	Installierte Leistung [W]	Betriebs-stunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	882 kWh	VSSH
	WP Winter	1'082	442 kWh	
	WP Sommer	1'082	291 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	719	871 kWh	SIA 380/1
TOTAL			<u>2'486 kWh</u>	

Jahreskosten	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 3'299
Kapital		
Energie	Elektrizität	2'486 kWh

Erdregister-Anlage mit Luftheizung in Niedrigenergie - EFH

Kenndaten der Anlage

Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft - Erdregister		
	Schema Typ	34	IGJ	
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 müM		
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a		
	Heiztage	HT 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	4 Pers		
	Bauart	Niedrigenergiehaus		
	Heizenergiebedarf	Qh 120 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 60 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 150 m2	Annahme	
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	2.6 kW	18 W/m2	Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C		
	Raumtemperatur	Ti 20 °C		
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0.11 -	Schätzung	
	Zeitkonstante	τ 78 h	Schätzung	
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.33	Qww/(Qww+Qh)	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Luftheizung (ohne statisches Heizsystem)		
	Zulufttemperatur	TZUL 30 °C		
	Ablufttemperatur	TABL 20 °C		
	Vorlauftemp. (Auslegung)	Tv 35 °C	Planung	
	Rücklauftemp. (Auslegung)	Tr 25 °C	Planung	
	Energierückgewinn WRG	36 MJ/m2.a	30% von Qh	
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.95 -	Annahme	
	Luftmenge	829 m3/h	Planung	
	Raumluftwechsel	2.2 1/h	2.5 m Raumhöhe	
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme	
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt	Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C		
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers		
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW		
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.1 h/d		
	Betriebsstunden Wärmepumpe	677 h/a		
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a		
	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2 0.85 -		
Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP	2.8 kW	AWP	
	installierte Leistung A-2/W35	3.0 kW	+ 10%	EKZ Töss
	Leistungsziffer A5/W35	COPw1 3.7	IGJ	
	Winterarbeitszahl Heizung	WAZ1 3.2	COP-0.5	RAVEL
	Leistungsziffer A5/W50	COPw2 2.9	IGJ	
	Winterarbeitszahl Warmwasser	WAZ2 2.4	COP-0.5	RAVEL
	Leistungsziffer A15/W50	COPs 3.5	IGJ	
	Sommerarbeitszahl (Warmwasser)	SAZ 3.0	COP-0.5	RAVEL
	Technischer Speicher	150 l	2 Schalt/h	Dimens.
	Betriebsstunden	1'212 h/a		
Wärmequellenanlage	Typ	Lufterdregister		
	Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C	2.8 kW	EKZ Töss	
	Luftvolumen Wärmepumpe	2'000 m3/h	Hoval	
	Länge der Rohre	40 m	Planung	
	Anzahl parallele Rohre	3 -	Planung	
	Durchmesser der Rohre	200 mm		
	Luftgeschwindigkeit	5.9 m/s		
	Rohrmaterial	PVC	15 Fr/m	Spreng
	Rohrinnenoberfläche	75 m2		

Anlagekosten

Vorgaben	Realzins	p	2%	Annahme
	Kosten pro m2 Erdregister		194 Fr./m2	für 75 m2
				IGJ

		Investitions- kosten [Fr.]	Amorti- sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmenutzungsanlage	Kosten Luftheizg. (WRG) - Kosten stat. Heizung	Fr. 0	15	7.8%	Fr. 0	
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 14'653	40	3.7%	Fr. 536	IGJ
TOTAL		Fr. 39'653			Fr. 2'493	

	Investitions- kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer	Fr. 5'000	2.0%	Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe	Fr. 20'000	4.0%	Fr. 800	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Fr. 0	5.0%	Fr. 0	SIA 380/2
Wärmequellenanlage	Fr. 14'653	1.5%	Fr. 220	VSSH SI
TOTAL			Fr. 1'120	

	Installierte Leistung [W]	Betriebs- stunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh
	WP Winter	1'269	408	518 kWh
	WP Sommer	1'005	269	270 kWh
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	950	1212	1'151 kWh
TOTAL				2'822 kWh

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 3'613
Energie	Elektrizität	2'822 kWh

Schotterkoffer-Anlage mit Luftheizung in Niedrigenergie - EFH

Kenndaten der Anlage

		Quelle		
Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft / Schotterkoffer		
	Schema Typ	34	IGJ	
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 müM		
	Heizgradtage 12/20	HGT	3'500 K d/a	
	Heiztage	HT	220 d/a	
Gebäude	Gebäudetyp	Einfamilienhaus		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	4 Pers		
	Bauart	Niedrigenergiehaus		
	Heizenergiebedarf	Qh	120 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Energiebedarf Warmwasser	Qww	60 MJ/m2.a	SIA 380/1
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF	150 m2	Annahme
	Wärmeleistungsbedarf Heizung		2.6 kW	18 W/m2 Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta	-8 °C	
	Raumtemperatur	Ti	20 °C	
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ	0.11 -	Schätzung
	Zeitkonstante	τ	78 h	Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω	0.33	Qww/(Qww+Qh) SIA 380/1
	Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Luftheizung (ohne statisches Heizsystem)	
Zulufttemperatur		TZUL	30 °C	
Ablufttemperatur		TABL	20 °C	
Vorlauftemp. (Auslegung)		Tv	35 °C	Planung
Rücklauftemp. (Auslegung)		Tr	25 °C	Planung
Energierückgewinn WRG			36 MJ/m2.a	30% von Qh
Wärmenutzungsgrad		η1	0.95 -	Annahme
Luftmenge			829 m3/h	Planung
Raumluftwechsel			2.2 1/h	2.5 m Raumhöhe
Brauchwassererwärmer		Grösse Wassererwärmer	300 l	Annahme
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt Annahme	
	Vorwärmung mit WP	45 °C		
	Normalverbrauch pro Person	34.5 l/d.Pers		
	Leistung Elektro-Einsatz	0.8 kW		
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	10.1 h/d		
	Betriebsstunden Wärmepumpe	677 h/a		
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'103 h/a		
Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP	2.8 kW	AWP	
	installierte Leistung A-2/W35	3.0 kW	+ 10% EKZ T6ss	
	Leistungsziffer A5/W35	COPw1	3.7	IGJ
	Winterarbeitszahl Heizung	WAZ1	3.2	COP-0.5 RAVEL
	Leistungsziffer A5/W50	COPw2	2.9	IGJ
	Winterarbeitszahl Warmwasser	WAZ2	2.4	COP-0.5 RAVEL
	Leistungsziffer A15/W50	COPs	3.5	IGJ
	Sommerarbeitszahl (Warmwasser)	SAZ	3.0	COP-0.5 RAVEL
	Technischer Speicher		150 l	2 Schalt/h Dimens.
	Betriebsstunden		1'212 h/a	
Wärmequellenanlage	Type	Schotterkoffer		
	Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C	2.8 kW		
	Gesamtvolumen Schotterkoffer	14 m3	5.0 m3/kW EKZ/T1.1	

Anlagekosten

		Quelle	
Vorgaben	Realzins	p	2%
	Kosten pro m3 Schotterkoffer		322 Fr./m3 für 14 m3
			Annahme IGJ

Investitionen						
		Investitions- kosten [Fr.]	Amorti- sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 5'000	20	6.1%	Fr. 306	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung, Elektro	Fr. 20'000	14	8.3%	Fr. 1'652	AFB
Wärmenutzungsanlage	Kosten Luftheizg. (WRG) - Kosten stat. Heizung	Fr. 0	15	7.8%	Fr. 0	
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 4'454	40	3.7%	Fr. 163	IGJ
TOTAL		Fr. 29'454			Fr. 2'121	

Betriebskosten				
	Investitions- kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer	Fr. 5'000		Fr. 100	VSSH SI
Wärmepumpe	Fr. 20'000		Fr. 800	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Fr. 0		Fr. 0	SIA 380/2
Wärmequellenanlage	Fr. 4'454		Fr. 67	VSSH SI
TOTAL			Fr. 967	

Energieverbrauch					
	Instalierte Leistung [W]	Betriebs- stunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf		
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	800	1103	882 kWh	VSSH
	WP Winter	1'269	408	518 kWh	
	WP Sommer	1'005	269	270 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	950	1'212	1'151 kWh	SIA 380/1

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 3'087
Energie	Elektrizität	2'822 kWh

Erdsonden-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in Mehrfamilienhaus

Kenndaten der Anlage

				Quelle
Gesamtsystem	Wärmequelle	Erdsonde		
	Schema Typ	60	IGJ	
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 müM		
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a		
	Heiztage	HT 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp	Mehrfamilienhaus, 6 Whg.		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	25 Pers		
	Bauart	konventionell		
	Heizenergiebedarf	Qh 450 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 100 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 600 m2	Annahme	
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	36.0 kW	60 W/m2	Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C		Schätzung
	Raumtemperatur	Ti 20 °C		Schätzung
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0.09 -		Schätzung
	Zeitkonstante	τ 65 h		Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.18	Qww/(Qww+Qh)	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Radiatoren		
	Vorlaufemp. (Auslegung)	TV 50 °C	Planung	
	Rücklaufemp. (Auslegung)	TR 40 °C	Planung	
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.90 -	Annahme	
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	750 l	Annahme	
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt	Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C		
	Normalverbrauch pro Person	36.8 l/d.Pers		
	Leistung Elektro-Einsatz	4.0 kW		
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	13.4 h/d		
	Betriebsstunden Wärmepumpe	312 h/a		
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'471 h/a		
Wärmepumpe	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2 0.85 -		
	benötigte Kondensatorleistung WP	40.0 kW		AWP
	installierte Leistung S0/W50	44.0 kW	+ 10%	
	Leistungsziffer S0/W50	COP 3.3	IGJ	
	Jahresarbeitszahl	JAZ 2.8	COP-0.5	RAVEL
	Technischer Speicher	1'900 l	2 Schalt/h	Dimens.
Wärmequellenanlage	Nennleistungs-Betriebsstunden	1'894 h/a		
	Typ	Erdsonden (Duplex)		
	Kälteleistung WP S0/W35	34.0 kW	Leist. 0/50 + 20%	EKZ Töss
	Gesamtbetriebsstd. WP auf Nennleistung	2206 h/a		
	Jährlicher Energieentzug aus Erdreich	75022 kWh		
	Sondenlänge total	680 m	0.050 kW/m	AWP
			bzw. 130 kWh/m	AWP

Anlagekosten

				Quelle
Vorgaben	Realzins	p	2%	Annahme
	Kosten pro Meter Sonde		89 Fr./m	IGJ
			für 680 m	

Investitionen		Investitions- kosten [Fr.]	Amorti- sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 6'000	20	6.1%	Fr. 367	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 50'000	14	8.3%	Fr. 4'130	AFB
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 60'631	40	3.7%	Fr. 2'216	IGJ
TOTAL		<u>Fr. 116'631</u>			<u>Fr. 6'713</u>	

Betriebskosten		Investitions- kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 6'000	2.0%	Fr. 120	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 50'000	4.0%	Fr. 2'000	SIA 380/1
Wärmequellenanlage		Fr. 60'631	1.5%	Fr. 909	VSSH SI
TOTAL				<u>Fr. 3'029</u>	

Energieverbrauch		Installierte Leistung [W]	Nennleistungs- Betriebsstunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	4'000	1471	5'882 kWh	VSSH
Wärmepumpe	WP	15'658	312	4'885 kWh	
	Betriebsenergie WP	15'658	1894	29'656 kWh	SIA 380/1
TOTAL				<u>40'423 kWh</u>	

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 9'743
Energie	Elektrizität	40'423 kWh

Erdregister-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in Mehrfamilienhaus

Kenndaten der Anlage

				Quelle
Gesamtsystem	Wärmequelle	Luft - Erdregister		
	Schema Typ	1	IGJ	
	Betriebsart	monovalent		
	Brauchwassererwärmung	Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		
Klima	Höhenlage	450 müM		
	Heizgradtage 12/20	HGT 3'500 K d/a		
	Heiztage	HT 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp	Mehrfamilienhaus, 6 Whg.		
	Lage	freistehend		
	Bewohner / Benutzer	25 Pers		
	Bauart	konventionell		
	Heizenergiebedarf	Qh 450 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Energiebedarf Warmwasser	Qww 100 MJ/m2.a	SIA 380/1	
	Beheizte Bruttogeschossfläche	EBF 600 m2	Annahme	
	Wärmeleistungsbedarf Heizung	36.0 kW	60 W/m2	Annahme
	Auslegungstemperatur	Ta -8 °C		
	Raumtemperatur	Ti 20 °C		
	Gewinn/Verlust-Verhältnis	γ 0.09 -		Schätzung
	Zeitkonstante	τ 65 h		Schätzung
	Energieanteil Warmwasser	ω 0.18	Qww/(Qww+Qh)	SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe	Radiatoren		
	Vorlauftemp. (Auslegung)	TV 50 °C	Planung	
	Rücklauftemp. (Auslegung)	TR 40 °C	Planung	
	Wärmenutzungsgrad	η1 0.90 -	Annahme	
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer	750 l	Annahme	
	Temperatur Warmwasser	60 °C	10 °C kalt	Annahme
	Vorwärmung mit WP	45 °C		
	Normalverbrauch pro Person	36.8 l/d.Pers		
	Leistung Elektro-Einsatz	4.0 kW		
	Ladezeit durchschnittlich (100% elektro)	13.4 h/d		
	Betriebsstunden Wärmepumpe	312 h/a		
	Betriebsstunden Elektro-Einsatz	1'471 h/a		
Wärmepumpe	Wirkungsgrad Warmwasseranlage	η2 0.85 -		
	benötigte Kondensatorleistung WP	40.0 kW	AWP	
	installierte Leistung A-2/W35	44.0 kW	EKZ Töss	
	Leistungsziffer A5/W50	COPw 2.9	IGJ	
	Winterarbeitszahl	WAZ 2.4	COP-0.5	RAVEL
	Leistungsziffer A15/W50	COPs 3.5	IGJ	
	Sommerarbeitszahl (Warmwasser)	SAZ 3.0	COP-0.5	RAVEL
	Technischer Speicher	1'900 l	2 Schaltf	Dimens.
	Nennleistungs-Betriebsstunden	1'894 h/a		
	Wärmequellenanlage	Typ	Lufterdregister	
Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C		40.0 kW	EKZ Töss	
Luftvolumen Wärmepumpe		19'000 m3/h	Hoval	
Länge der Rohre		40 m		
Anzahl parallele Rohre		28 -		
Luftgeschwindigkeit		6.0 m/s		
Durchmesser der Rohre		200 mm		
Rohrmaterial		PVC	15 Fr/m	Spreng
Rohrinnenoberfläche	704 m2			

Anlagekosten

Vorgaben	Realzins	p	2%		Quelle
	Kosten pro m2 Erdregister		147 Fr./m2	für 704 m2	IGJ

Investitionen		Investitions-kosten [Fr.]	Amorti-sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 6'000	20	6.1%	Fr. 367	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 50'000	14	8.3%	Fr. 4'130	AFB
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 103'602	40	3.7%	Fr. 3'787	
TOTAL		Fr. 159'602			Fr. 8'284	

Betriebskosten		Investitions-kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 6'000	2.0%	Fr. 120	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 50'000	4.0%	Fr. 2'000	SIA 380/1
Wärmequellenanlage		Fr. 103'602	1.5%	Fr. 1'554	VSSH SI
TOTAL				Fr. 3'674	

Energieverbrauch		Installierte Leistung [W]	Nennleistungs Betriebsstunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	4'000	1471	5'882 kWh	VSSH
	WP Winter	18'372	188	3'454 kWh	
	WP Sommer	14'545	124	1'803 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	18'372	1894	34'795 kWh	SIA 380/1
TOTAL				45'934 kWh	

Jahreskosten			
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)		Fr. 11'958
Energie	Elektrizität		45'934 kWh

Schotterkoffer-Anlage mit hydraulischem Verteilsystem in Mehrfamilienhaus

Kenndaten der Anlage

				Quelle
Gesamtsystem	Wärmequelle Schema Typ Betriebsart Brauchwassererwärmung	Luft / Schotterkoffer 1 monovalent Vorwärmung mit WP, Elektro-Einsatz		IGJ
Klima	Höhenlage Heizgradtage 12/20 Heiztage	450 müM 3'500 K d/a 220 d/a		
Gebäude	Gebäudetyp Lage Bewohner / Benutzer Bauart Heizenergiebedarf Energiebedarf Warmwasser Beheizte Bruttogeschossfläche Wärmeleistungsbedarf Heizung Auslegungstemperatur Raumtemperatur Gewinn/Verlust-Verhältnis Zeitkonstante Energieanteil Warmwasser	Mehrfamilienhaus, 6 Whg. freistehend 25 Pers konventionell Qh 450 MJ/m2.a Qww 100 MJ/m2.a EBF 600 m2 36.0 kW Ta -8 °C Ti 20 °C γ 0.09 - τ 65 h ω 0.18	60 W/m2	SIA 380/1 SIA 380/1 Annahme Annahme Schätzung Schätzung SIA 380/1
Wärmenutzungsanlage	Wärmeabgabe Vorlaufemp. (Auslegung) Rücklaufemp. (Auslegung) Wärmenutzungsgrad	Radiatoren TV 50 °C TR 40 °C η1 0.90 -		Planung Planung Annahme
Brauchwassererwärmer	Grösse Wassererwärmer Temperatur Warmwasser Vorwärmung mit WP Normalverbrauch pro Person Leistung Elektro-Einsatz Ladezeit durchschnittlich (100% elektro) Betriebsstunden Wärmepumpe Betriebsstunden Elektro-Einsatz Wirkungsgrad Warmwasseranlage	750 l 60 °C 45 °C 36.8 l/d.Pers 4.0 kW 13.4 h/d 312 h/a 1'471 h/a η2 0.85 -	10 °C kalt	Annahme Annahme
Wärmepumpe	benötigte Kondensatorleistung WP installierte Leistung A-2/W50 Leistungsziffer A5/W50 Winterarbeitszahl Leistungsziffer A15/W50 Sommerarbeitszahl (Warmwasser) Technischer Speicher Nennleistungs-Betriebsstunden	40.0 kW 44.0 kW 2.9 2.4 3.5 3.0 1'900 l 1'894 h/a		AWP EKZ Töss IGJ RAVEL IGJ RAVEL Dimens.
Wärmequellenanlage	Typ Wärmeleistungsbedarf Heizung bei -8 °C Gesamtvolumen Schotterkoffer	Schotterkoffer 40.0 kW 200 m3	5.0 m3/kW	EKZ/TIA

Anlagekosten

Vorgaben	Realzins	p	2%	Annahme
	Kosten pro m3 Schotterkoffer		233 Fr./m3	IGJ

Investitionen		Investitions- kosten [Fr.]	Amorti- sation [Jahre]	Annuität	Jährliche Kapitalkosten [Fr./a]	
Brauchwassererwärmer	inkl. Montage, Isolation	Fr. 6'000	20	6.1%	Fr. 367	AFB
Wärmepumpe	inkl. Montage, Steuerung,	Fr. 50'000	14	8.3%	Fr. 4'130	AFB
Wärmequellenanlage	komplett	Fr. 46'667	40	3.7%	Fr. 1'706	
TOTAL		<u>Fr. 102'667</u>			<u>Fr. 6'203</u>	

Betriebskosten		Investitions- kosten [Fr.]	Index Unterhalt	Jährliche Unterhaltskosten [Fr.]	
Brauchwassererwärmer		Fr. 6'000	2.0%	Fr. 120	VSSH SI
Wärmepumpe		Fr. 50'000	4.0%	Fr. 2'000	SIA 380/1
Wärmequellenanlage		Fr. 46'667	1.5%	Fr. 700	VSSH SI
TOTAL				<u>Fr. 2'820</u>	

Energieverbrauch		Installierte Leistung [W]	Nennleistungs- Betriebsstunden [h/a]	Elektrischer Energiebedarf	
Brauchwassererwärmer	Elektro-Einsatz	4'000	1471	5'882 kWh	VSSH
	WP Winter	18'372	188	3'454 kWh	
	WP Sommer	14'545	124	1'803 kWh	
Wärmepumpe	Betriebsenergie WP	18'372	1894	34'795 kWh	SIA 380/1
TOTAL				<u>45'934 kWh</u>	

Jahreskosten		
Kapital	Amortisation und Betrieb (ohne Energie)	Fr. 9'023
Energie	Elektrizität	45'934 kWh