



Schlussbericht
**Erhöhung der
Quellentemperatur
von Wärmepumpen**

**Auswirkungen auf Jahresarbeitszahl und
Wirtschaftlichkeit**

IMPRESSUM

Auftraggeberin:

Stadt Zürich,
Amt für Hochbauten,
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik,
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Bearbeitung:

Martin Ménard, Luigi Mattei
Lemon Consul GmbH
menard@lemonconsult.ch

Projektleitung:

Franz Sprecher
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik,
Amt für Hochbauten

Begleitteam:

Christian Erb (Halter GU, Zürich)
Michael Kriegers (Meierhans + Partner AG, Scherzenzbach)
Franz Sprecher (Stadt Zürich, AHB)
René Wolfensberger (Stadt Zürich, AHB)

Download als pdf von
www.stadt-zuerich.ch/egt
> Projekte realisiert

Zürich, Juni 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Projektübersicht.....	6
2.1	Ausgangslage	6
2.2	Grosses Potential.....	6
2.3	Zielsetzung.....	6
2.4	Vorgehensweise.....	6
3	Grundlagen.....	8
3.1	Zielsetzung.....	8
3.2	Struktur.....	8
3.3	Systemkombinationen.....	8
3.4	Wärmequellentemperaturen	11
3.5	Gebäudetypen.....	13
3.6	Charakteristik und Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpen	14
3.7	Wirtschaftlichkeit	15
4	Detailstudien - Simulationen mit Polysun	16
4.1	Zielsetzung.....	16
4.2	Systemauswahl - Wärmequellen	16
4.3	Gebäudetyp.....	16
4.4	Wärmepumpen.....	17
4.5	Wärmeverteilung und Wärmeabgabe	17
4.6	Anlagen-Schema mit Luft/Wasser-Wärmepumpe	18
4.7	Anlagen-Schema mit Erdsonden-Wärmepumpe	18
4.8	Anlagen-Schema mit Abwärme-Wärmepumpe	21
4.9	Energieverbrauch der Wärmequellen-Pumpen	21
5	Ergebnisse der Polysun-Simulationen	22
5.1	Einleitung	22
5.2	Ergebnisse MFH Erneuerung	22
5.3	Ergebnisse MFH MINERGIE-Neubau.....	22
5.4	Ergebnisse MFH Neubau nur Heizung	23
5.5	Ergebnisse Erdsondenfelder.....	24
6	Wirtschaftlichkeit.....	26
6.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung	26
6.2	Ergebnisse	26
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	28
7.1	Schlussfolgerungen	28
7.2	Vergleich mit anderen Studien.....	28
7.3	Empfehlung für ein Pilotprojekt.....	29
7.4	Weitere Massnahmen zur Optimierung von Wärmepumpenanlagen	29
7.5	Erfahrungen mit Polysun.....	29
8	Anhang – Abschätzung der JAZ mit WPesti	31
9	Literaturverzeichnis	32

1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht Systeme zur Erhöhung der Wärmequellentemperatur von Wärmepumpen bezüglich deren Auswirkungen auf die Jahresarbeitszahl und die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen. Im Zentrum stehen Anwendungen für mittlere bis grosse Mehrfamilienhäuser, als Neubau oder nach einer energetischen Gesamtanierung.

In detaillierten Simulationen mit Polysun werden die folgenden Systemkombinationen untersucht:

- Luft/Wasser-Wärmepumpe kombiniert mit einem Solar-Luftkollektor
- Erdsonden-Wärmepumpe kombiniert mit einem Trockenkühler zur Nutzung der Aussenluft als Wärmequelle bei hohen Lufttemperaturen
- Erdsonden-Wärmepumpe kombiniert mit unverglasten und verglasten Solarkollektoren
- Wasser/Wasser-Wärmepumpe mit einer idealen, 24°C warmen Abwärmequelle

Bei den Anlagen mit Erdsonden dient das Erdreich auch als Wärmespeicher für überschüssige Wärmegevinne. Entsprechend aufwendig wird die hydraulische Schaltung und Regelung dieser Anlagen, damit in jedem Betriebszustand die höchst mögliche aber nur die maximal zulässige Verdampfer-Eintrittstemperatur erzielt und die Wärmequellen optimal bewirtschaftet werden können. Zudem wird unterschieden zwischen Anlagen mit Einzelsonden und Erdsondenfeldern.

Die Simulationen ergeben eine maximale Steigerung der Jahresarbeitszahl von 9% bei Einzelsonden und 22% bei Erdsondenfeldern. Trotz dieser Steigerung ist die Kombination von Wärmequellen aufgrund der höheren Investitionskosten im Vergleich zu Anlagen mit nur einer primären Wärmequelle bei den heutigen Strompreisen nicht wirtschaftlich. Es besteht jedoch die Möglichkeit, durch die Kombination von unverglasten Solarkollektoren mit Erdsondenfeldern die Investitionskosten bei konstanter Jahresarbeitszahl zu optimieren.

In der vorliegenden Studie werden heute auf dem Markt verfügbare Wärmepumpen untersucht. Eine weitere Optimierung der Jahresarbeitszahl kann durch die Einführung von Niedrighub-Wärmepumpen erwartet werden.

2 Projektübersicht

2.1 Ausgangslage

Wärmepumpen spielen in der aktuellen und zukünftigen Energie- und Gebäudetechnik eine immer wichtigere Rolle. Eine hohe Energieeffizienz von Wärmepumpen wird durch tiefe Vorlauftemperaturen auf der Wärmeabgabeseite und hohe Temperaturen auf der Wärmequellenseite ermöglicht.

Die Stadt Zürich will mit der vorliegenden Studie aufzeigen, welche Möglichkeiten es gibt und welche Massnahmen sinnvoll und wirtschaftlich genutzt werden können, um die Quelltemperatur von Wärmepumpenanlagen zu erhöhen. In einer zweiten Studie werden die Möglichkeiten auf der Wärmeabgabeseite untersucht [1].

2.2 Grosses Potential

Ein grosser Teil der Gebäude in der Stadt Zürich hat das Potential zur Nutzung von Erdsonden oder Grundwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen. Die Effizienz solcher Anlagen kann noch gesteigert werden, indem z.B. überschüssige Wärme im Sommer aus den Gebäuden in das Erdreich zurückgespeist wird. Durch einen Ausgleich von Wärmeentzug und Wärmeeintrag wird das Erdreich langfristig zum Saisonspeicher auf hohem Temperaturniveau. Auch solare Wasser- oder Luftkollektoren stellen eine interessante Option zur Erhöhung der Quelltemperatur von Wärmepumpen dar, besonders in Kombination mit Erdsonden oder analoge Technologien zur saisonalen Speicherung von Wärme.

Ein weiteres enormes Potential bildet die Nutzung von Abwärme aus Fortluft und Abwasser von Gebäuden, gewerblichen und industriellen Prozessen, Tiefgaragen und Tunnels.

Eine Herausforderung stellen die vielen bestehenden Gebäude dar, welche auch nach einer Erneuerung der Bauhülle oft nicht die für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb wünschbaren tiefen Vorlauftemperaturen erreichen. Die Erhöhung der Wärmequellentemperatur könnte daher gerade im Bereich der Gebäudeerneuerung die Effizienz von Wärmepumpen verbessern.

2.3 Zielsetzung

Mit dem Projekt sollen die folgenden Ziele erreicht werden:

- Es soll das Grundlagenwissen zur Evaluation der Möglichkeiten zur Erhöhung der Quelltemperatur von Wärmepumpen bereitgestellt werden.
- Zielgruppe der Studie sind städtische Gebäudetechniker, externe Planer und Projektleiter des AHB.
- Die Studie soll zudem als Grundlage für weiterführende P&D-Projekte dienen.

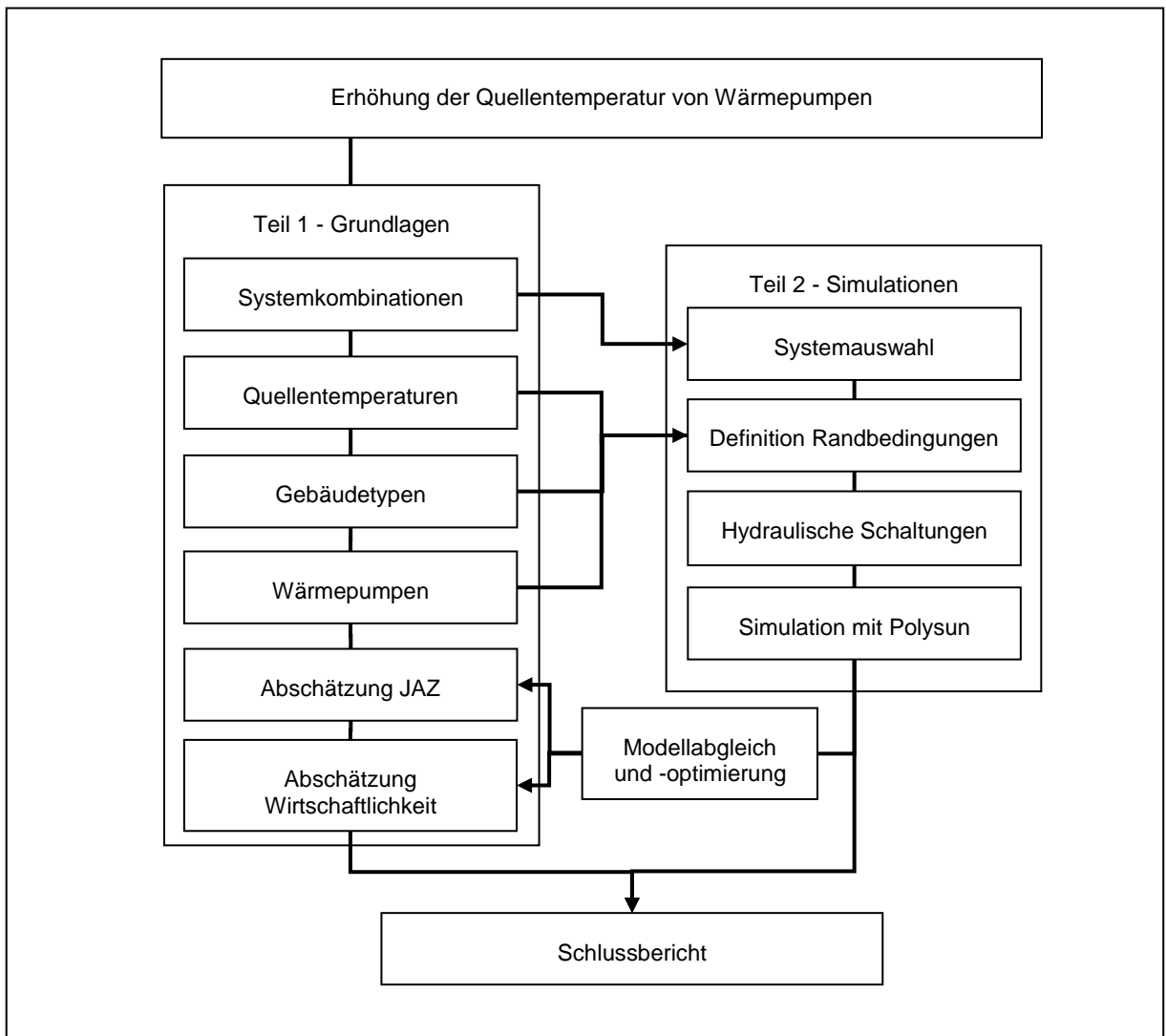
2.4 Vorgehensweise

Das Projekt ist in zwei Teilprojekte unterteilt:

1. Charakterisierung der verfügbaren Systeme zur Erhöhung der Quelltemperatur. Diese soll als Auslegeordnung der möglichen Systemkombinationen und damit auch zur Abgrenzung und Klärung der Begriffe dienen. Zudem soll anhand weniger Parameter eine einfache Abschätzung des Nutzungsgrads und der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Systeme ermöglicht werden.

2. Detailstudie der erfolgversprechenden Systemkombinationen in typischen Anwendungsfällen . Die zu untersuchenden Systemkombinationen werden mit dem Programm Polysun modelliert und die Jahresarbeitszahl und der Systemnutzungsgrad anhand von dynamischen Simulationen berechnet.

Figur 1: Projektstruktur und Arbeitsmodule



3 Grundlagen

3.1 Zielsetzung

Es soll eine Auslegeordnung der möglichen Systemkombinationen aufgestellt und damit auch eine Abgrenzung und Klärung der Begriffe vorgenommen werden. Die Grundlagenermittlung soll eine Vorauswahl der vielversprechendsten Systemkombinationen zu Erhöhung der Quellentemperaturen ermöglichen. Die ausgewählten Systemkombinationen werden im 2. Teil der Studie anhand von Simulationen bezüglich ihrem Potential zur Erhöhung der Jahresarbeitszahl detailliert untersucht.

Es sollen zudem auch die wichtigsten Parameter definiert werden, anhand derer eine einfache Abschätzung des Nutzungsgrads und der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Systemkombinationen in einer frühen Planungsphase ermöglicht wird.

3.2 Struktur

Die Grundlagenermittlung umfasst die folgenden Teilbereiche:

- Beschreibung der Systemkombinationen von Wärmequellen
- Charakterisierung der Wärmequellen (Temperatur-/ Leistungsverlauf)
- Beschreibung von Gebäudetypen
- Beschreibung der Wärmepumpencharakteristik
- Abschätzung der Jahresarbeitszahl
- Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

3.3 Systemkombinationen

Die nutzbaren Wärmequellen werden unterteilt in primäre und sekundäre Wärmequellen. Als primäre Wärmequellen werden die folgenden vier Wärmequellen bezeichnet:

- Aussenluft (AUL)
- Erdwärme (z.B. aus Erdsonden: ES)
- Grundwasser (GW)
- Oberflächenwasser (OW)

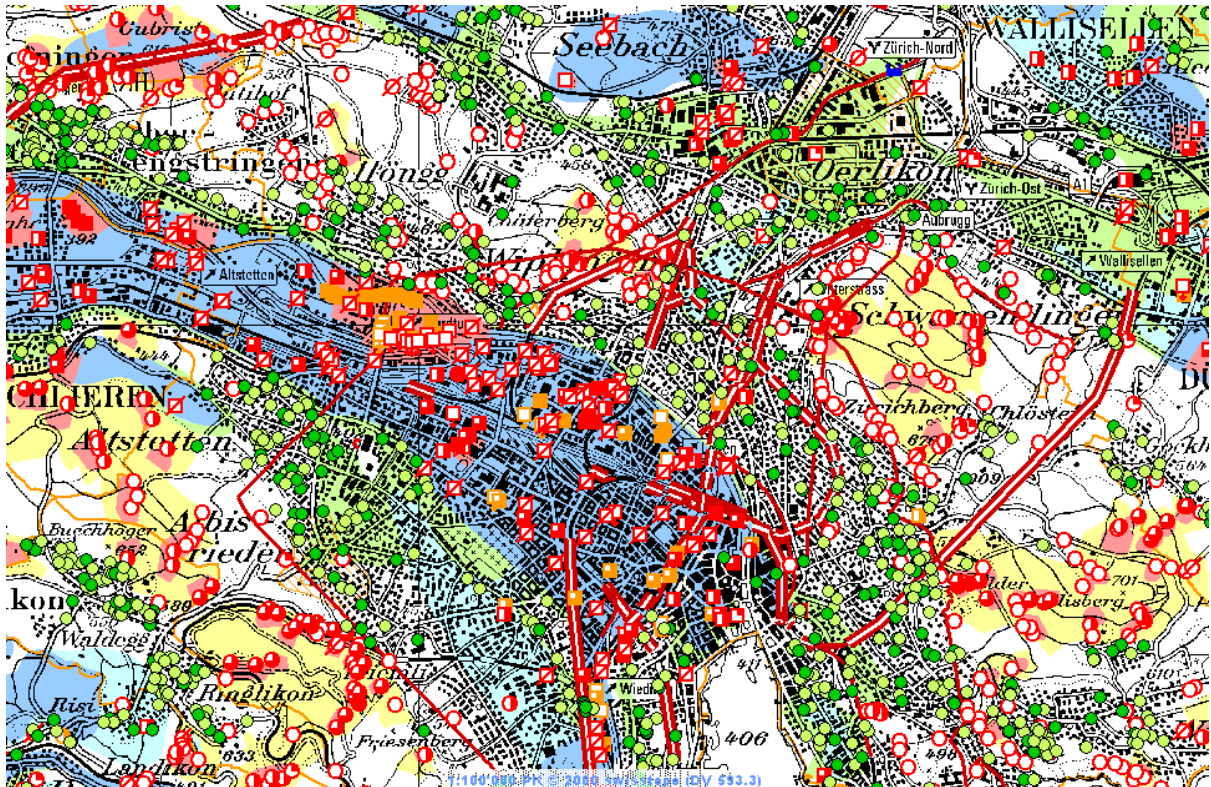
Aussenluft hat den Vorteil, dass sie praktisch überall als Wärmequelle genutzt werden kann. Andererseits ist die Aussenlufttemperatur gerade während der Heizperiode besonders tief, was bei Luft/Wasser-Wärmepumpen zu verhältnismässig schlechten Jahresarbeitszahlen im Bereich von 2.5 – 3.5 führt. Zudem stellen die Lärmemissionen des Ventilators von Luft/Wasser-Wärmepumpen im dichtbesiedelten Stadtgebiet einen erheblichen Schwachpunkt dar.

Erdwärme kann über Erdsonden oder oberflächennahe Erdwärmetauscher wie Erdluftwärmetauscher, Erdwärmeregister, Erdwärmepfähle, Erdwärmekörbe etc. genutzt werden. Aufgrund deren grösseren Verbreitung und des höheren Temperaturniveaus werden in der vorliegenden Studie primär Erdwärmesonden untersucht. Neben der Kombination von Erdsonden mit anderen Wärmequellen wie z.B. Solarkollektoren stellt auch die Verlängerung der Erdsonden eine gängige Massnahme zur Erhöhung der Quellentemperatur dar.

Die Verbreitung von Erdwärmesonden und Grundwasserfassungen in der Stadt Zürich ist in Figur 2 dargestellt.

Die Nutzung von Oberflächenwasser beschränkt sich in der Stadt Zürich im Wesentlichen auf Gebäude in der Nähe von See, Limmat oder Sihl.

Figur 2: Wärmenutzungsatlas für das Gebiete der Stadt Zürich (www.gis.zh.ch); blaue und grüne Flächen sind für die Grundwassernutzung, weisse Flächen für Erdsonden geeignet; grüne Punkte = bestehende Erdsonden, rote/orange Quadrate = bestehender Grundwasserfassungen.



Neben den primären Wärmequellen können die folgenden sekundären Wärmequellen genutzt und mit den primären Wärmequellen kombiniert werden.

- Abluft auf tiefem Temperaturniveau (z.B. Lüftungs-/Klimaanlage mit Wärmerückgewinnung, Abluft aus Tiefgaragen und Tunnels). Abluft mit tiefem Temperaturniveau ist typischerweise leicht wärmer als die Aussenlufttemperatur.
- Abluft auf hohem Temperaturniveau (z.B. aus Lüftungs-/Klimaanlagen ohne WRG) weist in der Regel eine mehr oder weniger konstante Temperatur auf.
- Solarwärme aus unverglasten Niedertemperatur-Kollektoren. Die Temperatur des Wärmeträgerfluids liegt im Winter im Bereich der Aussentemperatur. Im Sommer können je nach Betriebskonzept Temperaturen von typischerweise 20 – 30°C auftreten.
- Solarwärme aus verglasten Flach- oder Röhrenkollektoren auf hohem Temperaturniveau. Die Temperatur des Wärmeträgerfluids liegt bei direkter Solarstrahlung im Winter im typischerweise Bereich von 20 – 30°C und im Sommer bei 30 – 40 °C.
- Rohabwasser, dessen Abwärme direkt im Gebäude oder auf dem Grundstück genutzt wird. Das Temperaturniveau liegt im Bereich von 15 – 25°C.
- Rohabwasser aus der öffentlichen Kanalisation. Das Temperaturniveau liegt im Bereich von 10 – 20°C.
- Abwärme aus der Erzeugung von Klimakälte (nur im Sommer verfügbar). Das Temperaturniveau liegt typischerweise im Bereich von 18 – 23°C.
- Abwärme aus industriellen oder gewerblichen Prozessen (verfügbar über das ganze Jahr). Das Temperaturniveau hängt vom Prozess ab und kann im Jahresverlauf konstant oder variabel sein.

Natürlich existieren noch weitere Wärmequellen und es können im Prinzip auch drei und mehr Wärmequellen miteinander kombiniert werden. Zum gegenwertigen Zeitpunkt wird aber ein möglichst einfaches und übersichtliches System bevorzugt.

Auf die kombinierte Nutzung von Solarwärme für die direkte Warmwassererzeugung und zusätzlich zur Erhöhung der Quellentemperatur wird in dieser Studie nicht eingegangen. Die Quellen [6, 7] behandeln diese Anwendung ausführlicher.

Tabelle 1 Systemkombinationen von Wärmequellen mit den in dieser Studie verwendeten Abkürzungen

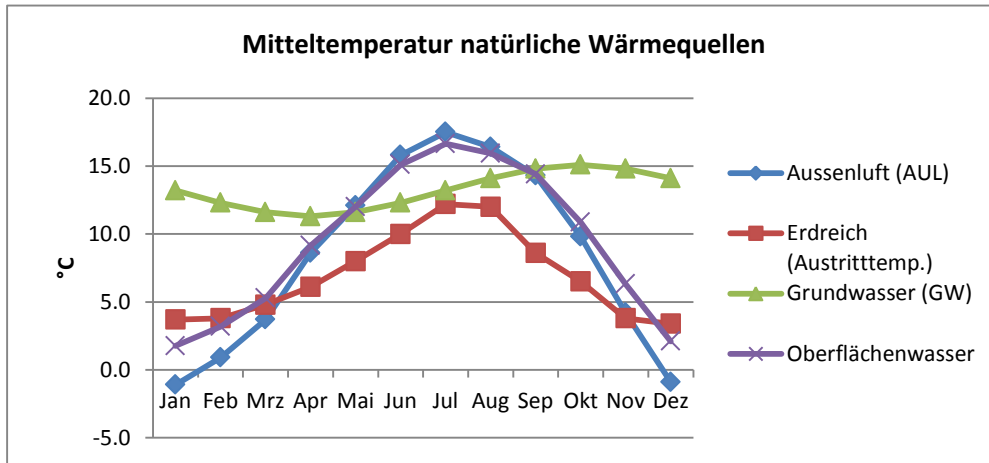
Luft-Wasser (LW)	AUL-0	Aussenluft (AUL)
	AUL-1	AUL + Erdluftwärmetauscher
	AUL-2	AUL + Erdwärme oberflächennah (Register, Pfähle, Körbe, etc.)
	AUL-3	AUL + Erdsonden
	AUL-4	AUL + Abluft Niedertemp. (Lüftung mit WRG, Tiefgarage, etc.)
	AUL-5	AUL + Abluft Hochtemp. (Lüftung ohne WRG)
	AUL-6	AUL + Solarwärme Niedertemp. (unverglaster Kollektor)
	AUL-7	AUL + Solarwärme Hochtemp. (verglaster Kollektor)
	AUL-8	AUL + Rohabwasser auf Grundstück
	AUL-9	AUL + Rohabwasser auf öffentlichem Grund
	AUL-10	AUL + Abwärme aus Klimakälte
	AUL-11	AUL + Abwärme aus Industrie/Gewerbe
	AUL-12	AUL + Grundwasser
	AUL-13	AUL + Oberflächenwasser
Sole-Wasser (SW)	ES-0	Erdsonde (ES)
	ES-1	ES + Aussenluft
	ES-2	ES + Erdluftwärmetauscher
	ES-3	ES + Erdwärme oberflächennah (Register, Pfähle, Körbe, etc.)
	ES-4	ES + Abluft Niedertemp. (Lüftung mit WRG, Tiefgarage, etc.)
	ES-5	ES + Abluft Hochtemp. (Lüftung ohne WRG)
	ES-6	ES + Solarwärme Niedertemp. (unverglaster Kollektor)
	ES-7	ES + Solarwärme Hochtemp. (verglaster Kollektor)
	ES-8	ES + Rohabwasser auf Grundstück
	ES-9	ES + Rohabwasser auf öffentlichem Grund
	ES-10	ES + Abwärme aus Klimakälte
	ES-11	ES + Abwärme aus Industrie/Gewerbe
	ES-12	ES + Grundwasser
	ES-13	ES + Oberflächenwasser
Wasser-Wasser (WW)	GW-0	Grundwasser (GW)
	GW-1	GW + Aussenluft
	GW-2	GW + Erdluftwärmetauscher
	GW-3	GW + Erdwärme oberflächennah (Register, Pfähle, Körbe, etc.)
	GW-4	GW + Erdsonden
	GW-5	GW + Abluft Niedertemp. (Lüftung mit WRG, Tiefgarage, etc.)
	GW-6	GW + Abluft Hochtemp. (Lüftung ohne WRG)
	GW-7	GW + Solarwärme Niedertemp. (unverglaster Kollektor)
	GW-8	GW + Solarwärme Hochtemp. (verglaster Kollektor)
	GW-9	GW + Rohabwasser auf Grundstück
	GW-10	GW + Rohabwasser auf öffentlichem Grund
	GW-11	GW + Abwärme aus Klimakälte
	GW-12	GW + Abwärme aus Industrie/Gewerbe
	GW-13	GW + Oberflächenwasser

Die Liste der Kombinationen von Oberflächenwasser mit anderen Wärmequellen ist analog der Kombinationen mit Grundwasser als primäre Wärmequelle.

3.4 Wärmequellentemperaturen

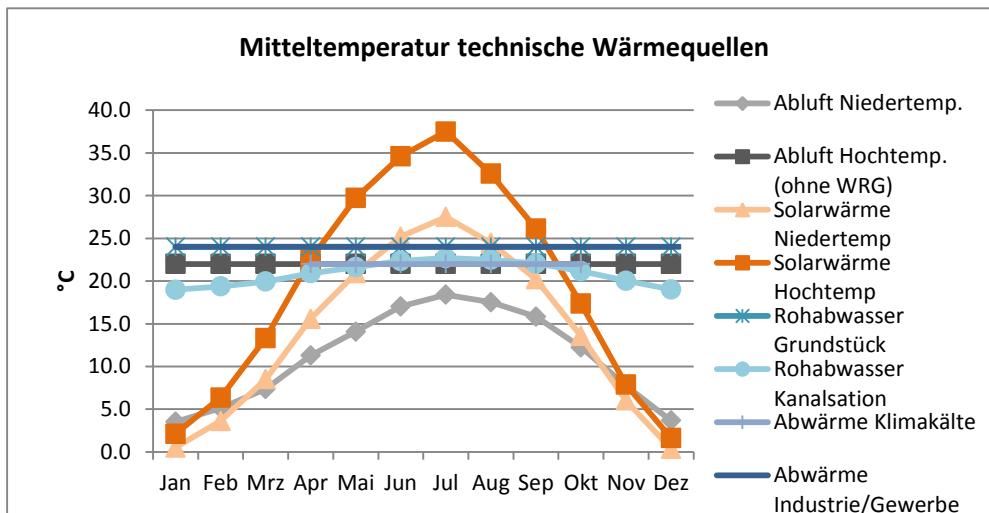
Das Temperaturniveau der primären Wärmequellen hängt vom Standort und der Anlagenkonfiguration ab. Vereinfachend kann von den in Figur 3 dargestellten monatlichen Mitteltemperaturen ausgegangen werden.

Figur 3: Typischer Verlauf der monatlichen Mitteltemperaturen der natürlichen Wärmequellen. Je nach Standort und Belastung der Quelle kann sich der Verlauf ändern.



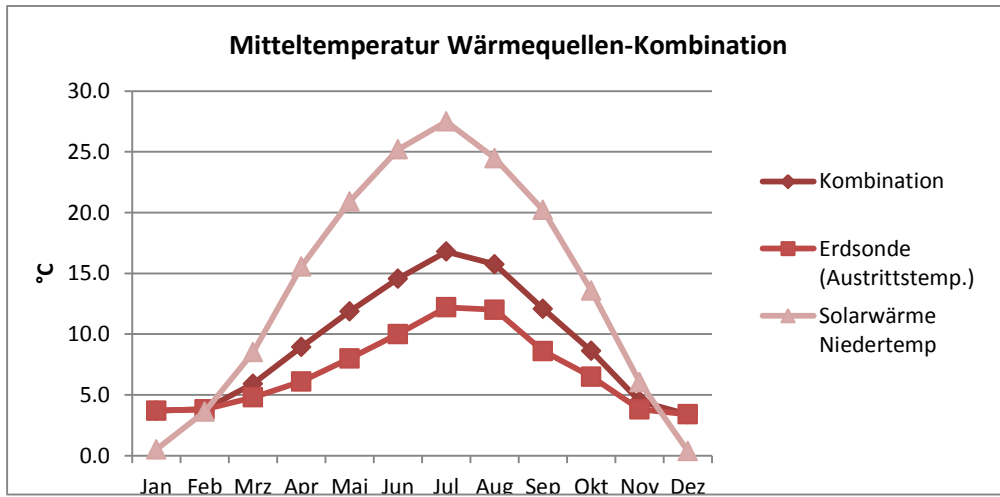
Die sekundären Wärmequellen sollen anhand weniger Angaben beschrieben werden können. In erster Näherung können Wärmequellen mit einer konstanten Temperatur (Abwasser, Abwärme, Abluft ohne WRG) und solche mit einem saisonalen Temperaturverlauf unterschieden werden. Saisonale Wärmequellen können näherungsweise als Funktion der Aussentemperatur abgebildet werden (siehe Figur 4).

Figur 4: Typischer Verlauf der monatlichen Mitteltemperaturen der sekundären Wärmequellen.



Bei zwei Wärmequellen kann vereinfachend eine kombinierte Quellentemperatur berechnet werden. Dafür müssen die Anteile der beiden Quellen am kombinierten Wärmestrom definiert werden (siehe [Figur 5](#)).

Figur 5: Verlauf der Mitteltemperaturen bei kombinierten Wärmequellen. Im Beispiel werden die beiden Quellen im Verhältnis von 70% (Erdsonden) zu 30% (Solar-Niedertemperatur) gewichtet.



3.5 Gebäudetypen

Neben der Temperatur der Wärmequelle sind auch die Gebäudenutzung, der Energiestandard der Gebäudehülle und das Temperaturniveau der Wärmeabgabesysteme entscheidend für die Jahresarbeitszahl der Wärmeerzeugung.

Bezüglich der Gebäudenutzung fokussiert die vorliegende Studie auf mittlere bis grosse Mehrfamilienhäuser, da diese im Stadtgebiet besonders stark verbreitet sind und weil anhand der Ergebnisse für Wohnbauten auch Aussagen für andere Gebäudekategorien abgeleitet werden können.

In [Tabelle 2](#) sind 3 Typen von Mehrfamilienhäusern mit den charakteristischen Eigenschaften für vollständig erneuerte, nach MINERGIE-Standard neu erstellte Gebäude sowie als Spezialfall, ein Neubau, bei dem die Wärmepumpe nur für die Erzeugung der Heizwärme und nicht für das Warmwasser eingesetzt wird, abgebildet. Der 3. Gebäudetyp entspricht z.B. einer Lösung, bei der das Warmwasser vollständig durch eine Abluft- oder eine Abwasserwärmepumpe erzeugt wird.¹ Weitere Gebäudetypen (z.B. Bürogebäude) können bei Bedarf analog definiert werden. Die angegebenen Gebäudeeigenschaften werden auch für die Berechnung des Jahresnutzungsgrads mit Polysun zugrunde gelegt.

Tabelle 2 Eigenschaften der untersuchten Gebäudetypen

Gebäudenutzung Energiestandard		MFH Erneuerung	MFH MINERGIE- Neubau	MFH Neubau nur Heizung
Gebäudedimensionen				
Geschosse		6	6	6
EBF	m ²	966	966	966
Gebäudehüllzahl	-	1.04	1.04	1.04
Solltemperaturen				
Vorlauftemp. Heizung	°C	50	35	35
Rücklauftemp. Heizung	°C	40	30	30
Temp. WW an der Zapfstelle	°C	55	55	55
Raum-Solltemperatur	°C	21	21	21
Heizwärmebedarf				
Q _{h,li} (SIA 380/1)	MJ/m ²	141	113	113
Q _{h,eff} (SIA 380/1)	MJ/m ²	141	59	59
Speicherverluste Heizung	%	10	10	10
Total Heizwärme	MJ/m ²	155	65	65
Warmwasserbedarf				
Q _{ww} (SIA 380/1)	MJ/m ²	75	75	0
Personenfläche	m ² /P	60	60	60
WW-Bedarf pro Person	l/Pd	50	50	-
WW-Bedarf pro Tag	l/d	805	805	-
dT	°C	44	44	44
WW-Bedarf	MJ/m ²	56	56	-
WW Speicherverluste	%	15	15	15
Total Warmwasser	MJ/m ²	64	64	-
Total Wärmebedarf				
Tot. Heizwärme inkl. Verluste	kWh/m ²	43	18	18
Tot. WW inkl. Verluste	kWh/m ²	18	18	-
Tot. Wärme	kWh/m ²	61	35	18
Anteil WW an tot. Wärme	%	29	50	-
Leistungsbedarf Heizung + WW				
Total Wärmeleistungsbedarf	W/m ²	38	20	15

¹ Zurzeit sind in Zürich mehrere grössere Überbauungen von diesem Typ in Planung bzw. in Realisierung (Wohnsiedlung Triemli 1, Wohnsiedlungen Ettenfeld 1 + 2, Europaallee Baufeld H etc.)

Die Angaben zu Gebäudedimensionen und Heizwärmebedarf entsprechen in der Grössenordnung der städtischen Wohnsiedlung Paradis. Der Wärmebedarf für Warmwasser wird dabei nicht mit den Standardwerten nach SIA 380/1 sondern anhand des spezifischen Warmwasserbedarfs pro Bewohner (50 Liter pro Person und Tag) abgeschätzt. Diese Berechnung führt im Vergleich zu den Standardwerten nach SIA 380/1 zu leicht reduzierten Bedarfswerten für Warmwasser (64 statt 75 MJ/m²).

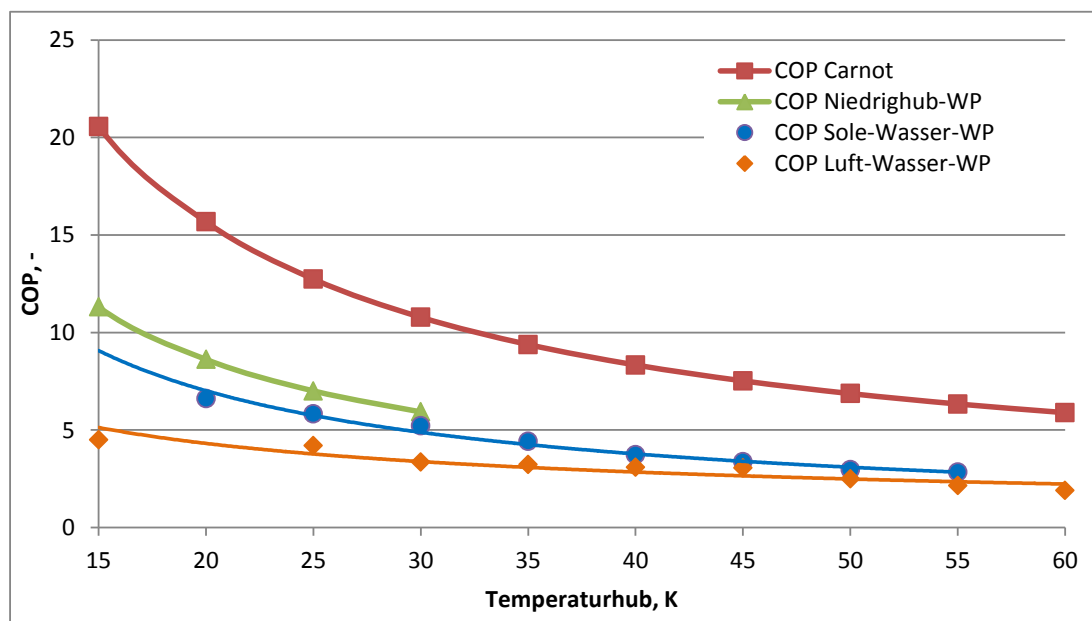
Die Warmwassertemperatur an der Zapfstelle wird auf 55°C festgelegt. Gemäss SIA 385/1 [9] müssen an der Zapfstelle 50°C, in den Leitungen 55°C und am Ausgang des Warmwassererzeuger 60°C eingehalten werden.

3.6 Charakteristik und Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpen

Die Charakteristik der Wärmepumpen wird durch die gemäss Prüfnormen EN 255 oder EN 14511 gemessene Heizleistung und die elektrische Leistungsaufnahme an definierten Stützstellen (z.B. A2/W35) beschrieben. Das Verhältnis der abgegebenen Heizleistung zur aufgenommenen elektrischen Leistung der Wärmepumpe wird als Leistungszahl oder COP bezeichnet. Die theoretisch maximal erreichbare Leistungszahl wird durch die Carnot-Leistungszahl begrenzt. Bei realen Wärmepumpen liegt der Gütegrad, d.h. des Verhältnis zwischen effektiver und Carnot-Leistungszahl, im Bereich von 50%.

In Figur 6 ist der Verlauf der Carnot-Leistungszahl sowie der Leistungszahl realer Sole/Wasser und Luft/Wasser Wärmepumpen gemäss Prüfergebnissen des Wärmepumpen-Testzentrum (WPZ) dargestellt [2]. Zudem ist der Verlauf einer Niedrighub-Wärmepumpe angegeben, welche im Rahmen einer Forschungsarbeit an der Hochschule Luzern ausgemessen wurde [3].

Figur 6: Verlauf des COP abhängig vom Temperaturhub zwischen Wärmequelle und Wärmeabgabe.



Ausschlaggebend für die Effizienz des Gesamtsystems ist die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpenanlage. Diese berücksichtigt neben der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe (Verdichter, Verdampferpumpe, Verflüssigerpumpe, Steuerung, Abtauung etc.) zusätzlich auch alle Pumpen, Ventilatoren und Regler, welche zur Bewirtschaftung der Wärmequellen benötigt werden. Die Verluste und der Hilfsenergiebedarf auf der Wärmeabgabeseite werden in der vorliegenden Studie nicht in der Jahresarbeitszahl eingerechnet, da diese für alle Systeme identisch sind.

Bei den zu untersuchenden Gebäudetypen sind je nach Wärmequelle die folgenden typischen Temperaturhübe und entsprechende COP-Werte zu erwarten:

Warmwassererzeugung, Quelltemperatur 0°C: Hub: 60 K, COP: 2.5 – 3.0

Warmwassererzeugung, Quelltemperatur 15°C: Hub: 45 K, COP: 3.0 – 3.5

Heizung 50 °C, Quellentemperatur 0°C:	Hub: 50 K, COP: 3.0 – 3.5
Heizung 50 °C, Quellentemperatur 15°C:	Hub: 35 K, COP: 3.5 – 4.5
Heizung 35°C, Quellentemperatur 0°C:	Hub: 35 K. COP: 3.5 – 4.5
Heizung 35°C, Quellentemperatur 15°C:	Hub: 20 K. COP: 4.0 – 7.0

Demnach sollte sich eine Erhöhung der Wärmequellentemperatur um 15 K vor allem bei tiefen Vorlauftemperaturen mit einem sprunghaften Anstieg des COP auswirken, während bei hohen Vorlauftemperaturen ein Anstieg des COP im Bereich von 10 – 20% erwartet werden kann.

3.7 Wirtschaftlichkeit

Für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit müssen die folgenden Daten erhoben werden:

- Die Investitionskosten pro Systemkomponente (z.B. für eine Luft/Wasser Wärmepumpe oder einen Niedertemperatur-Solarkollektor) werden anhand von Erfahrungswerten mit einem Grundbetrag und einem variablen Kostenanteil pro Heizleistung bzw. pro m² Kollektorfläche, pro Bohrmeter etc. abgeschätzt.
- Technische Lebensdauer der einzelnen Systemkomponenten und Wartungsaufwand in % der Investitionskosten, z.B. auf der Grundlage von SIA 382/1, Anhang G
- Realer Kalkulationszinssatz: 2.5%
- Reale Kostensteigerung Wartung/Bedienung/Unterhalt: 1%
- Reale Kostensteigerung Stromtarif Wärmepumpen: 1%

Es wird grundsätzlich mit realen, d.h. inflationsbereinigten Preisen gerechnet. Der verwendete Kalkulationszinssatz und die jährliche Kostensteigerung für Wartung/Bedienung/Unterhalt und für den Wärmepumpenstrom entsprechen der Vorgaben des Amts für Hochbauten für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Energiesystemen [4].

Anhand dieser Daten können die Jahreskosten als Summe von Kapital-, Wartungs- und Energiekosten berechnet werden. Aus dem Verhältnis der Jahreskosten zum gesamten Wärmebedarf des Gebäudes können die Wärmegestehungskosten ermittelt werden. Gesucht werden jene Systemkombinationen mit den tiefsten Wärmegestehungskosten.

Die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Systeme kann zudem anhand folgender Parameter beurteilt werden:

- Jahreskosten pro erzeugte kWh Wärme (Wärmegestehungskosten) in CHF/kWh
- Jahreskosten pro eingesparte kWh Elektrizität im Vergleich zur Basisvariante (nur Aussenluft, Erdsonde, Grundwasser als Wärmequelle) in CHF/kWh
- Jahreskosten pro eingespartes kg Treibhausgase im Vergleich zur Basisvariante (nur Aussenluft (AUL-0), Erdsonde (ES-0), Grundwasser (GW-0) als Wärmequelle) in CHF/kg Treibhausgasäquivalent.

4 Detailstudien - Simulationen mit Polysun

4.1 Zielsetzung

Ziel der Detailstudien ist für eine beschränkte Auswahl von Wärmequellenkombinationen und Gebäudetypen den Jahresnutzungsgrad mit einem Simulationsprogramm zu berechnen. Die Ergebnisse dienen der Plausibilisierung der Annahmen zum Verlauf der Wärmequellentemperaturen und der Jahresarbeitszahlen.

4.2 Systemauswahl - Wärmequellen

Für die Detailstudien sind durch die Begleitgruppe die folgenden Kombinationen von Wärmequellen ausgewählt worden:

für Luft/Wasser-Wärmepumpen:

- AUL-0 Aussenluft
- AUL-6 Aussenluft kombiniert mit einem Solar-Luftkollektor

für Sole/Wasser-Wärmepumpen:

- ES-0 Erdsonden
- ES-1 Erdsonden kombiniert mit einem Aussenluft-Wärmeübertrager
- ES-6 Erdsonden kombiniert mit einem unverglasten Niedertemperatur-Solarkollektor
- ES-7 Erdsonden kombiniert mit einem verglasten Hochtemperatur-Solarkollektor

und für Wasser/Wasser-Wärmepumpen (als Maximal-Variante):

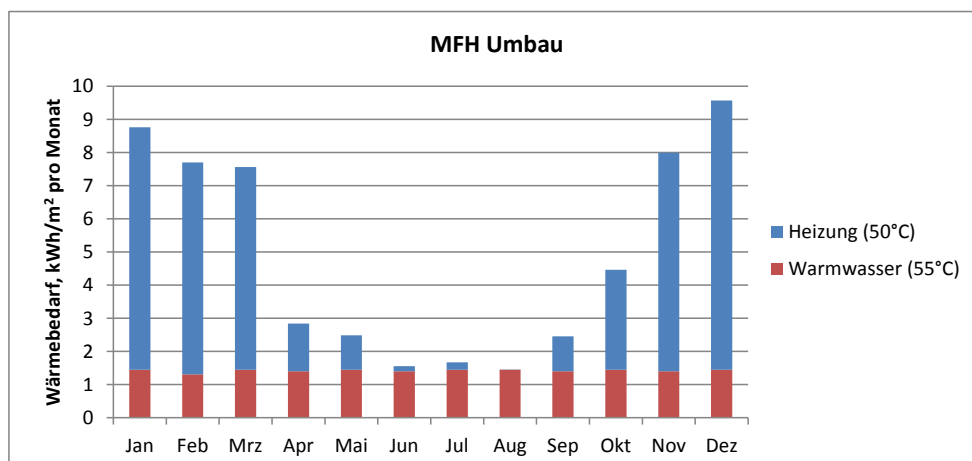
- AW-0 Abwärme mit konstant 24°C als Wärmequelle

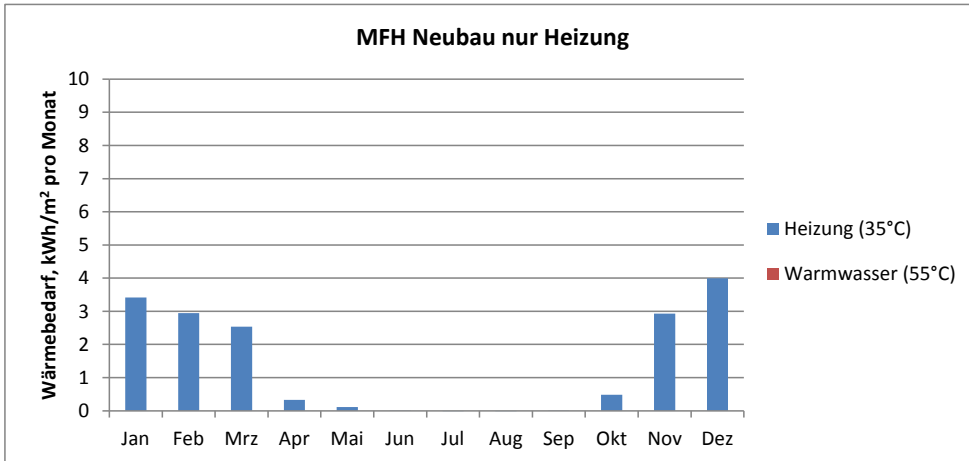
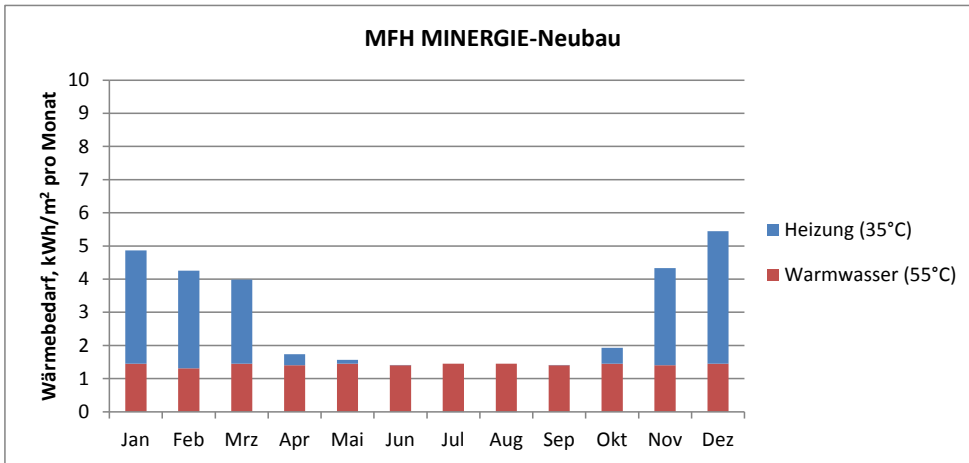
4.3 Gebäudetyp

Die Untersuchung erfolgt für das Mehrfamilienhaus aus [Tabelle 2](#) mit drei unterschiedlichen Dämmstandards und Vorlauftemperaturen. Das 6-geschossige, relativ kompakte Mehrfamilienhaus hat eine Energiebezugsfläche von 966 m² und eine Gebäudehüllzahl von 1.04.

Entscheidend für die Effizienz der Wärmepumpenanlagen sind einerseits die Vorlauftemperaturen für Heizung und Warmwasser und andererseits die jeweiligen Anteile von Heizung und Warmwasser am gesamten Wärmebedarf (siehe [Figur 7](#)).

Figur 7: Anteile von Heizung und Warmwasser am gesamten Wärmebedarf der 3 Gebäudetypen.





4.4 Wärmepumpen

Die Simulationen beruhen bei der Sole/Wasser Wärmepumpe auf der Charakteristik einer Hoval Thermalia Wärmepumpe (COP B0/W35: 4.7). Bei der Luft/Wasser Wärmepumpe wird die Charakteristik einer Hoval Belaria Wärmepumpe (COP A2/W35: 3.4) zugrunde gelegt.

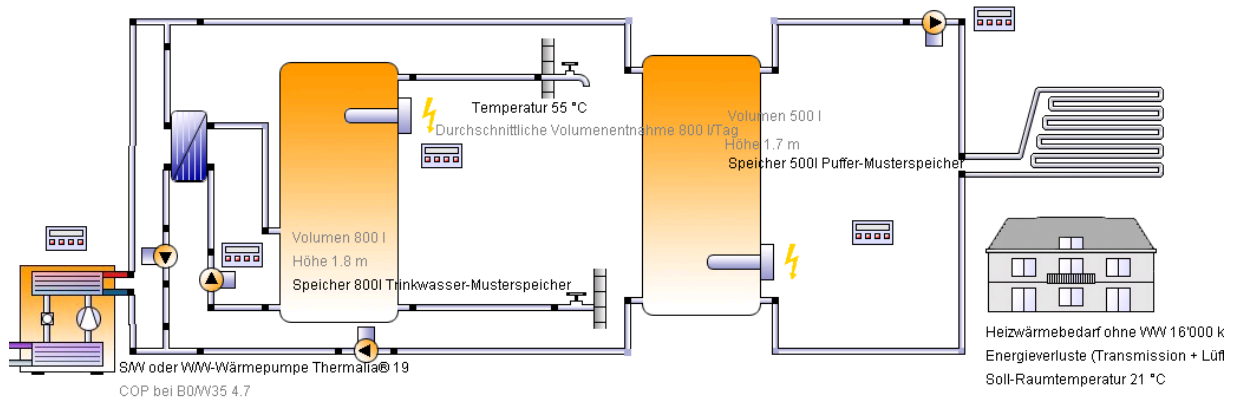
4.5 Wärmeverteilung und Wärmeabgabe

Die Hydraulik auf der Wärmeabgabeseite ist in allen Varianten identisch. Der 800 Liter Warmwasserspeicher ist auf den Tagesverbrauch dimensioniert und wird über einen externen Wärmeübertrager beladen. Im Heizkreis ist ein technischer Pufferspeicher mit 500 Liter Volumen integriert.

Beim Wärmeabgabesystem wird jeweils zwischen Radiatoren (Erneuerung) und Fussbodenheizung (Neubau) unterschieden. Da die Wärmeverteilung bei der Erneuerung nicht ersetzt wird, liegen die Vor- und Rücklauftemperaturen im Auslegungsfall bei 50/40°C. Der Heizwärmebedarf inkl. Speicherverluste von rund 10% liegt bei 43 kWh/m². Bei den beiden Neubau-Varianten liegen die Vor- und Rücklauftemperaturen im Auslegungsfall bei 35/29°C und der Heizwärmebedarf inkl. Speicherverlusten bei 18 kWh/m². Die Vorlauftemperaturen zur Beladung des Pufferspeichers liegt bei Auslegungsbedingungen bei knapp 40°C.

Der Warmwasserbedarf liegt sowohl bei der Erneuerung als auch beim Neubau bei 800 Liter pro Tag. Dieser Wert beruht auf der Annahme eines täglichen Warmwasserbedarfs pro Person von 50 Liter bei 55 °C. Ausstossverluste an den Zapfstellen sind in diesem Wert schon enthalten. Die Warmwassertemperaturen liegt aus Gründen des Legionellenschutzes im Speicher bei 60°C, an der Zapfstelle bei minimal 55°C. Die Vorlauftemperaturen zur Beladung des Warmwasserspeichers über den externen Wärmeübertrager liegt am Ende eines Ladezyklus bei rund 65°C.

Figur 8: Polysun-Schema der Wärmeverteilung und –abgabe

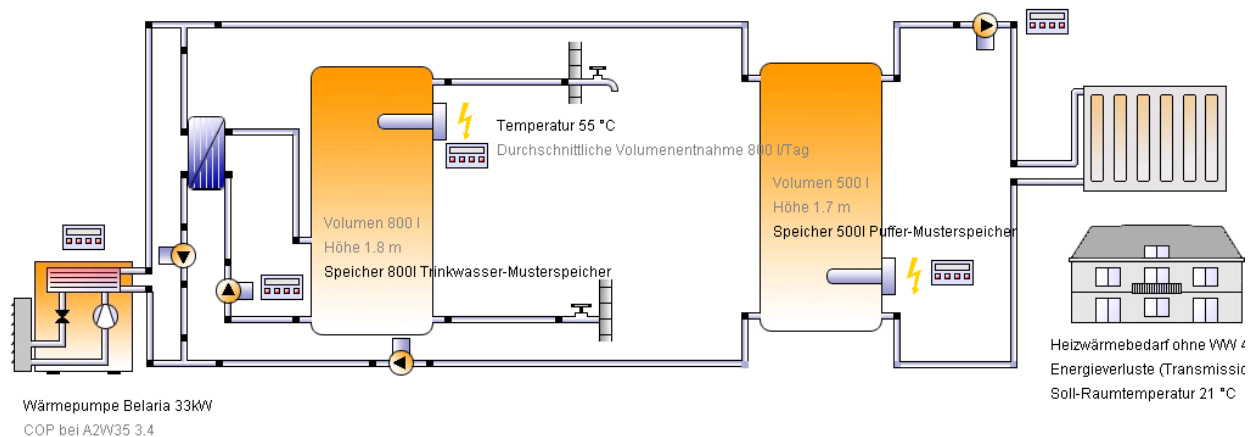


4.6 Anlagen-Schema mit Luft/Wasser-Wärmepumpe

Auf der Wärmequellen-Seite werden in Polysun unterschiedliche Systemkombinationen abgebildet. Die Variante einer reinen Luft/Wasser-Wärmepumpe (AUL-0) ist in Polysun als Standardmodul vorhanden. Für die Vorwärmung der Aussenlufttemperatur in einem Solar-Luftkollektor (AUL-6) gibt es jedoch kein passendes Modul. Die Stundenwerte für die Aussenlufttemperatur können auch nicht einfach abgepasst werden, da sich dies auch auf die Heizwärmebedarfsberechnung auswirken würde.

Die Systemkombination AUL-6 muss daher durch den „Umweg“ über eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit analoger Charakteristik der Luft-Wasser-Wärmepumpe von AUL-0 angenähert werden. Der Einfluss des Solar-Luftkollektors auf die Quellentemperatur wird extern berechnet. Dabei wird der benötigte Luftvolumenstrom anhand des Wärmebedarfs der Wärmepumpe berücksichtigt. Das Polysun-Schema sieht analog [Figur 13](#) aus.

Figur 9: Schema der Basisvariante einer Luft/Wasser-Wärmepumpe (AUL-0).



4.7 Anlagen-Schema mit Erdsonden-Wärmepumpe

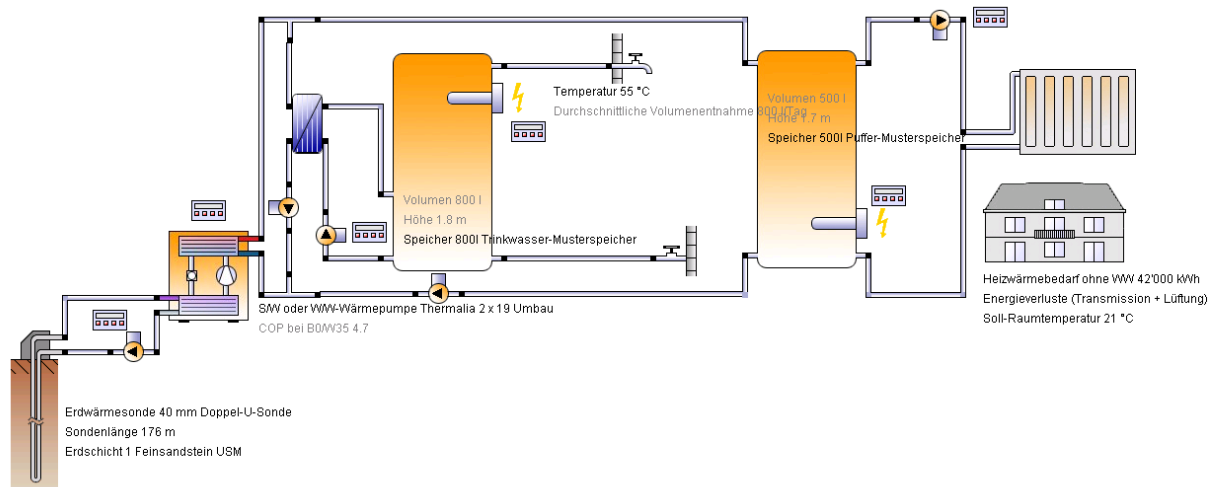
Die Basisvariante der Erdsonden-Wärmepumpe (ES-0) ist in [Figur 10](#) dargestellt. Für die Bemessung der Sondenlänge wird von einer maximalen jährlichen Entzugsenergie von 80 kWh pro m Sonde ausgegangen. Alle Erdsonden werden mit Doppel-U PE-Rohren mit 40 mm Durchmesser ausgelegt. Primär werden Erdsonden ohne oder mit nur geringfügiger gegenseitiger Beeinflussung untersucht. Die Anzahl und Länge der Erdsonden hängt vom Gebäudetyp ab und lautet wie folgt:

- MFH Erneuerung Sondenlänge: 3 x 176 m, Sondenabstand: 8.8 m
- MFH MINERGIE-Neubau Sondenlänge: 2 x 159 m, Sondenabstand: 8.0 m
- MFH Neubau nur Heizung Sondenlänge: 1 x 170 m

Zusätzlich werden auch Varianten mit Erdsondenfeldern untersucht (siehe 5.5)

Für das Erdreich wird eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 2.5 W/mK zugrunde gelegt.

Figur 10: Schema der Wärmequellen-Seite einer Erdsonden-Wärmepumpe (ES-0)



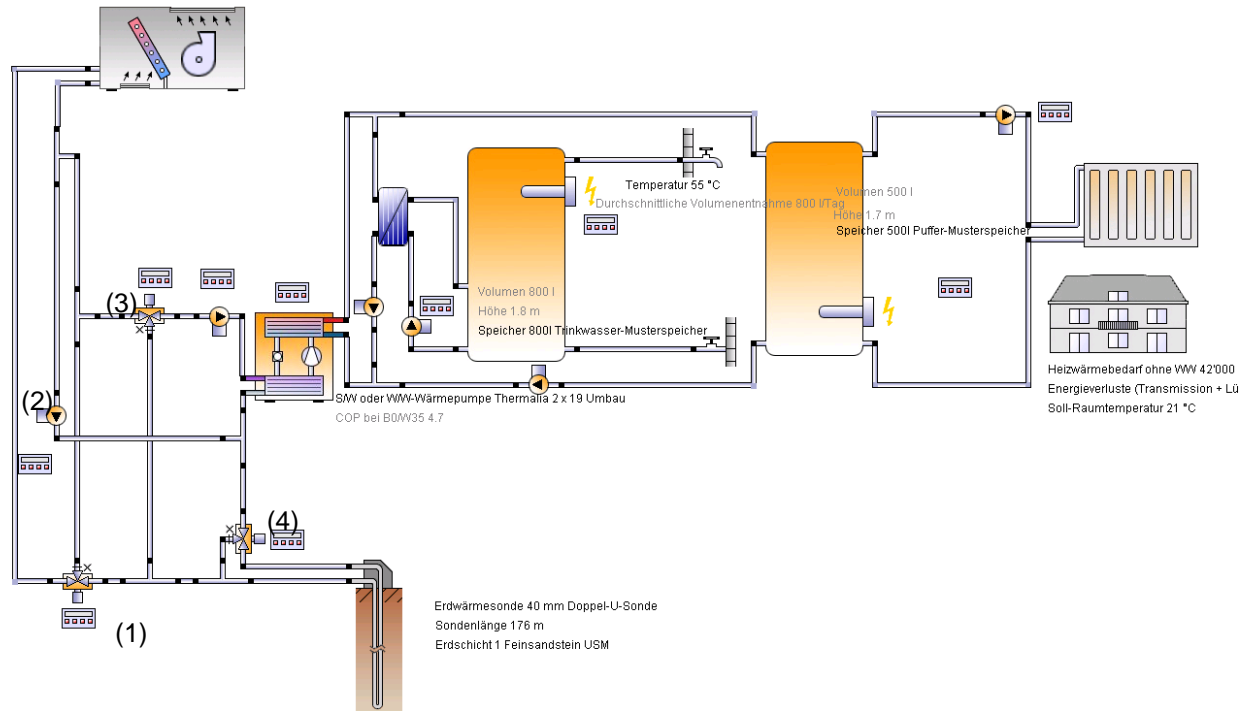
Die Kombination von Erdsonden mit Aussenluft ist in [Figur 11](#) [Figur 14](#) dargestellt. Bei hohen Aussenlufttemperaturen wird die Aussenluft als 2. Wärmequelle alternativ oder parallel zur Erdsonde als Wärmequelle genutzt.

Der Sondenkreis wird durch das Dreiwegventil (1) über den als Aussenluft-Wärmeübertrager genutzten Trockenkühler geführt, sobald die Aussenlufttemperatur 2 K über der Austrittstemperatur der Erdsonde liegt. Wenn das Dreiwegventil (1) geöffnet ist und die Wärmepumpe nicht läuft, wird die Erdsonde durch die Ladepumpe (2) regeneriert. Das Mischventil (3) sorgt dafür, dass die maximal zulässige Eintrittstemperatur am Verdampfer von 25 °C nicht überschritten wird. Solange die Austrittstemperatur des Trockenkühlers über der Austrittstemperatur der Erdsonde und unter der maximal zulässigen Eintrittstemperatur des Verdampfers liegt, wirkt das Dreiwegventil (4) als Bypass für die Erdsonde.

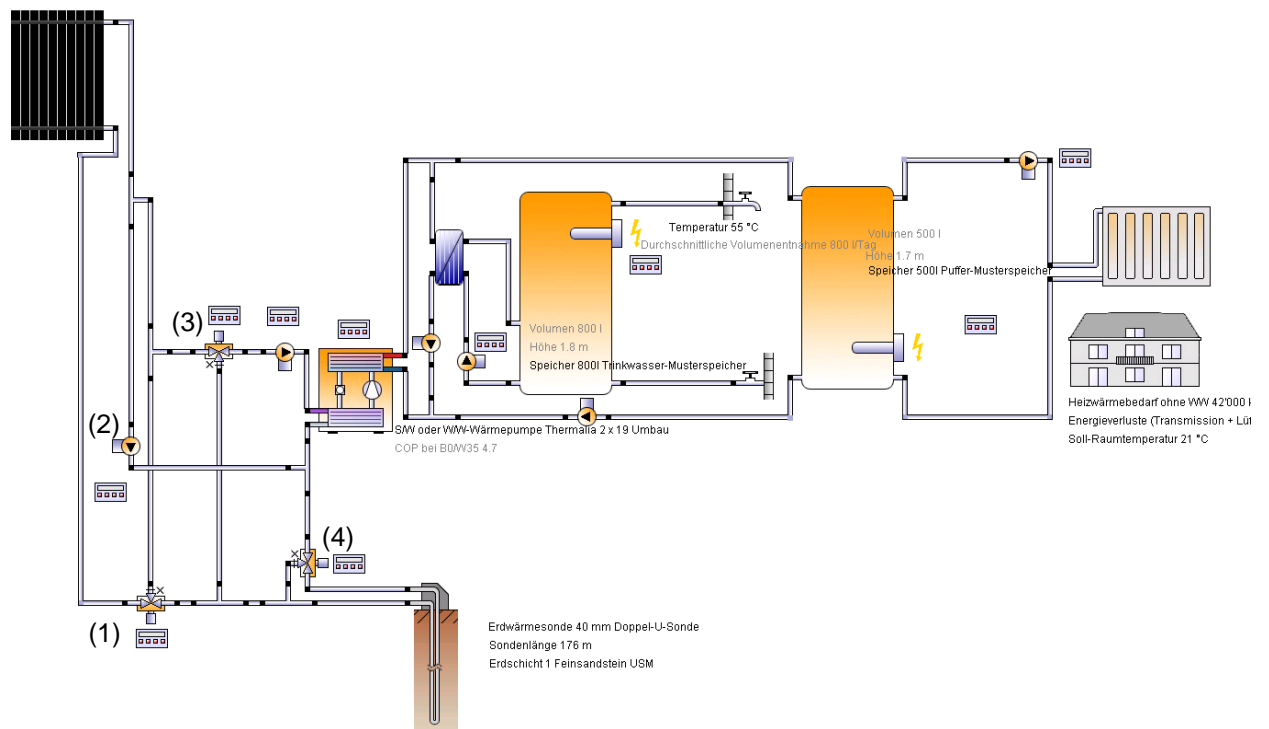
Der Trockenkühler wird so dimensioniert, dass er bei entsprechend hohen Aussenlufttemperaturen nahezu 100% des Leistungsbedarfs der Wärmepumpe decken kann. Dies bedeutet:

MFH Erneuerung:	30 kW
MFH MINERGIE-Neubau:	20 kW
MFH Neubau nur Heizung:	15 kW

Figur 11: Schema einer Erdsonden-Wärmepumpe kombiniert mit einem Trockenkühler zur Nutzung der Aussenluft als 2. Wärmequelle (ES-1)



Figur 12: Schema einer Erdsonden-Wärmepumpe kombiniert mit Solarkollektoren (ES-6 und ES-7)



Die Kombination von Erdsonden mit unverglasten (ES-6) oder verglasten (ES-7) Solarkollektoren in [Figur 12](#) dargestellt. Die hydraulische Schaltung ist analog zum vorangehenden Schema.

Damit der Ertrag des Solarkollektors möglichst optimal genutzt wird, werden die Betriebszeiten der Wärmepumpe bei ES-6 und ES-7 auf 9 – 16 Uhr beschränkt. Wenn die Sonne scheint, kann damit die Wärmepumpe zu nahezu 100% direkt ab Solarkollektor und ohne Erdsonde betrieben werden. Dank dieser Massnahme kann auf einen zweiten Pufferspeicher im Solarkreis verzichtet werden.

Auf die kombinierte Nutzung von Solarwärme für die direkte Warmwassererzeugung und zusätzlich zur Erhöhung der Quellentemperatur wird in dieser Studie nicht eingegangen. Die Quellen [6, 7] behandeln diese Anwendung ausführlicher.

Die Solarkollektoren werden so dimensioniert, dass sie bei direkter Solarstrahlung im Sommer mindestens 100% des Leistungsbedarfs der Wärmepumpe decken können und zudem zu einer annähernd ausgeglichenen Wärmebilanz der Erdsonden führen (Wärmeentzug = Wärmeeintrag):

MFH Erneuerung: unverglaster Kollektor: 80 m², verglaster Kollektor: 40 m²

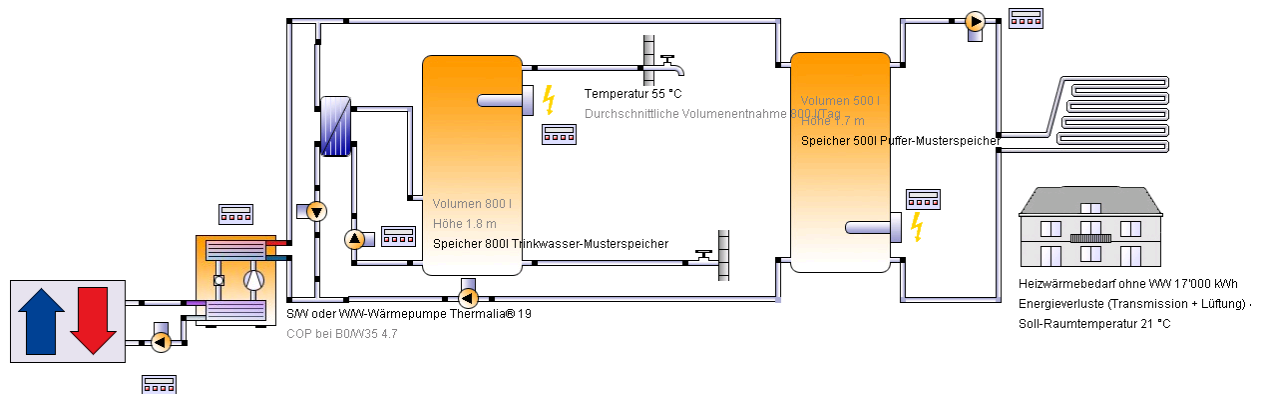
MFH MINERGIE-Neubau: unverglaster Kollektor: 40 m², verglaster Kollektor: 20 m²

MFH Neubau nur Heizung: unverglaster Kollektor: 12 m², verglaster Kollektor: 10 m²

4.8 Anlagen-Schema mit Abwärme-Wärmepumpe

Als Maximal-Variante wird zusätzlich eine Wasser/Wasser-Wärmepumpe mit einer Abwärmequelle von konstant 24 °C untersucht.

Figur 13: Schema einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe mit einer konstanten Abwärmequelle mit 24°C (AW-0)



4.9 Energieverbrauch der Wärmequellen-Pumpen

Der elektrische Energiebedarf für die Pumpen zur Bewirtschaftung der Wärmequellen wird bestimmt durch den Volumenstrom, den Druckverlust auf der Quellenseite und die Betriebsstunden.

Der Volumenstrom hängt von der Leistung der Wärmepumpe und der Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer Eintritt und Verdampfer Austritt ab. Sole/Wasser und Wasser/Wasser Wärmepumpen werden typischerweise mit einer Temperaturdifferenz von 3 K betrieben.

Bei den drei untersuchten Gebäudetypen bzw. Lastfällen resultieren damit die folgenden Volumenströme:

- MFH Erneuerung: 10'000 l/h
- MFH MINERGIE-Neubau: 5'000 l/h
- MFH Neubau nur Heizung: 2'500 l/h

Für den Druckverlust auf der Wärmequellenseite werden die folgenden typischen Werte verwendet:

- Erdsonde: 0.15 kpa/m, bei 150 m Doppel-U-Sonde: 45 kpa
- Zuleitung Erdsonde: 10 kpa
- Verdampfer: 40 kpa
- Solarkollektor (high flow) inkl. Solarkreis: 30 kpa
- Trockenkühler: 40 kpa
- Wärmeübertrager (Abwärme als Wärmequelle): 40 kpa

5 Ergebnisse der Polysun-Simulationen

5.1 Einleitung

Die Ergebnisse pro Gebäudetyp werden in den folgenden Kapiteln dargestellt und diskutiert. Die Eingabedaten und Ergebnisse der simulierten Systeme sind in [Tabelle 3](#) ~~Tabelle 3~~ zusammenfassend dargestellt.

5.2 Ergebnisse MFH Erneuerung

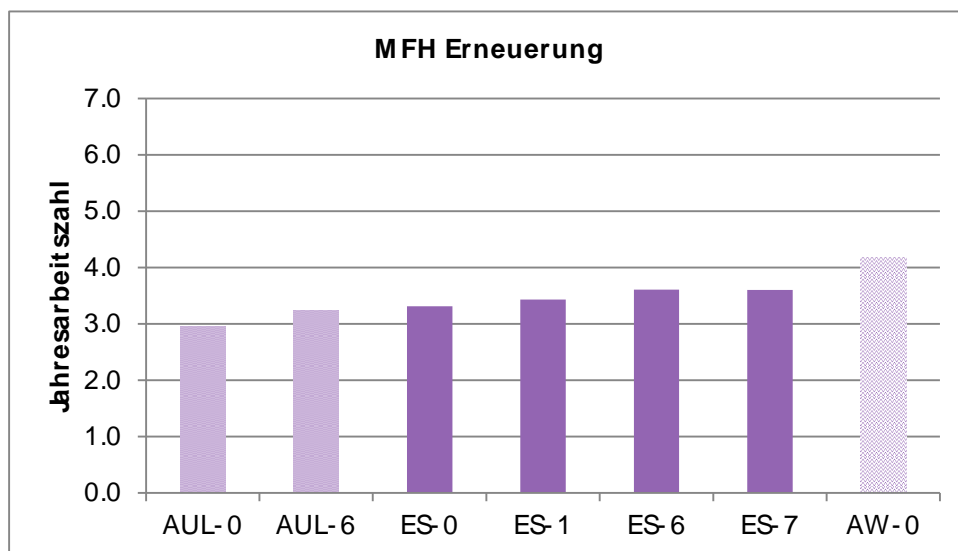
Beim Gebäudetyp MFH Erneuerung liegen die Jahresarbeitszahlen der untersuchten Varianten im Bereich von 3.0 – 4.2.

Die Variante Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Solar-Luftkollektor (AUL-6) liegt rund 9% über der Basisvariante mit einer reinen Luft/Wasser-Wärmepumpe (AUL-0).

Die Kombination von Erdsonden mit anderen Wärmequellen führt zu einer Erhöhung der JAZ von rund 3% (Trockenkühler ES-1) bis 9% (Niedertemperatur ES-6 und Hochtemperatur Solarkollektor ES-7).

Bei einer idealen Wärmequelle mit konstant 24 °C (AW-0) resultiert die maximale JAZ von 4.18. Da beim MFH Erneuerung die Vorlauftemperatur der Heizung bei 50°C und jene des Warmwassers bei 55°C liegt, muss die Wärmepumpe trotz der hohen Quellentemperatur einen Hub von 35 – 40 K überwinden. Aufgrund der Grädigkeit der Wärmeübertrager von Verdampfer und Verflüssiger und zur Kompensation von Verlusten auf der Wärmeabgabeseite kann der Temperaturhub zwischen Verdampfer (min. 20 °C) und Verdichter (max. 65 °C) bis zu 45 K betragen.

Figur 14: Jahresarbeitszahlen der untersuchten Systemkombinationen zur Erhöhung der Quellentemperatur des MFH Erneuerung



5.3 Ergebnisse MFH MINERGIE-Neubau

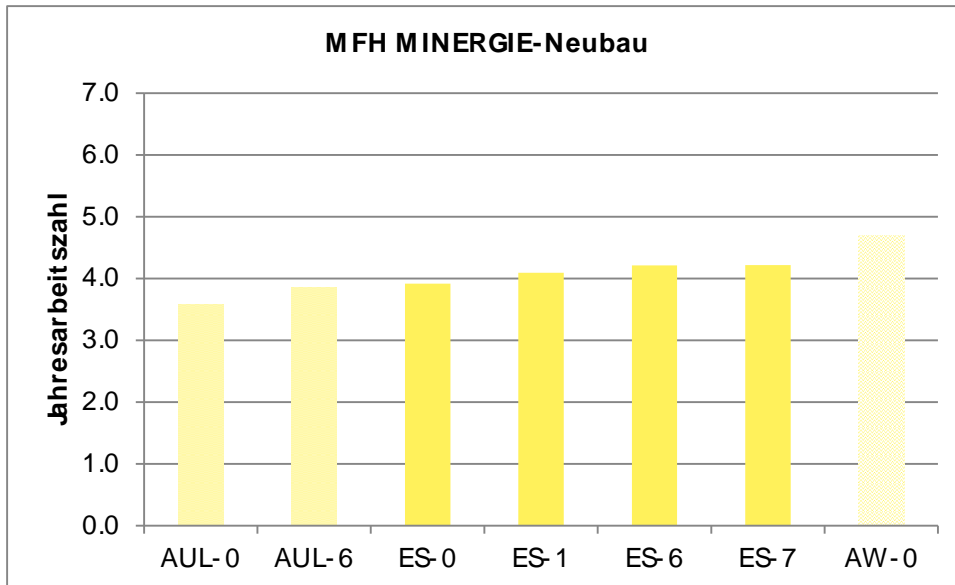
Beim Gebäudetyp MFH MINERGIE-Neubau liegen die Jahresarbeitszahlen der untersuchten Varianten im Bereich von 3.6 – 4.7.

Die Variante Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Solar-Luftkollektor (AUL-6) liegt rund 8% über der Basisvariante mit einer reinen Luft/Wasser-Wärmepumpe (AUL-0).

Die Kombination von Erdsonden mit anderen Wärmequellen führt zu einer Erhöhung der JAZ von rund 5% (Trockenkühler ES-1) bis 8% (Hochtemperatur Solarkollektor ES-7).

Bei einer idealen Wärmequelle mit konstant 24 °C (AW-0) resultiert die maximale JAZ von 4.70. Der durchschnittliche Temperaturhub zwischen Verdampfer-Eintritt und Verflüssiger-Austritt liegt im Bereich von 35 K.

Figur 15: Jahresarbeitszahlen der untersuchten Systemkombinationen zur Erhöhung der Quellentemperatur des MFH MINERGIE-Neubau



5.4 Ergebnisse MFH Neubau nur Heizung

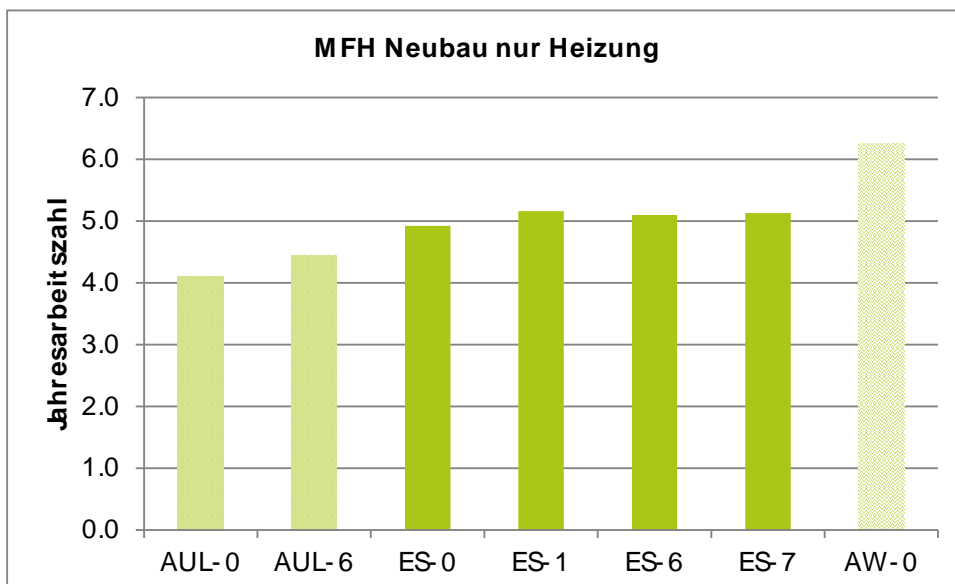
Beim Gebäudetyp MFH Neubau nur Heizung liegen die Jahresarbeitszahlen der untersuchten Varianten im Bereich von 4.1 – 6.3.

Die Variante Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Solar-Luftkollektor (AUL-6) liegt rund 8% über der Basisvariante mit einer reinen Luft/Wasser-Wärmepumpe (AUL-0).

Die Kombination von Erdsonden mit anderen Wärmequellen führt zu einer Erhöhung der JAZ von rund 5% (Trockenkühler ES-1) bzw. 4% (Niedertemperatur ES-6 und Hochtemperatur Solarkollektor ES-7).

Bei einer idealen Wärmequelle mit konstant 24 °C (AW-0) resultiert die maximale JAZ von 6.26. Der durchschnittliche Temperaturhub zwischen Verdampfer-Eintritt und Verflüssiger-Austritt liegt im Bereich von 25 K.

Figur 16: Jahresarbeitszahlen der untersuchten Systemkombinationen zur Erhöhung der Quellentemperatur des MFH MINERGIE-Neubau



5.5 Ergebnisse Erdsondenfelder

Im folgenden Abschnitt werden vier Systemvarianten ES-0, ES-1, ES-6 und ES-7 mit Erdsondenfeldern anstelle von Einzelsonden ohne gegenseitige Beeinflussung untersucht. Die Anordnung der Erdsondenfelder ist wie folgt:

- MFH Erneuerung Sondenlänge: 16 x 33 m, Sondenabstand: 3.3 m
- MFH MINERGIE-Neubau Sondenlänge: 9 x 35 m, Sondenabstand: 3.5 m
- MFH Neubau nur Heizung Sondenlänge: 4 x 43 m, Sondenabstand: 4.3 m

Dabei werden bewusst sehr geringe Sondenabstände gewählt damit die gegenseitige Beeinflussung der Sonden deutlich wird.

Bei allen Basisvarianten mit Erdsondenfeld (ES-0) fällt die JAZ tiefer aus als bei der Vergleichsvariante ohne Erdsondenfeld. Am deutlichsten ist dies beim Gebäudetyp MFH MINERGIE Neubau. Bei den Varianten Erdsonde kombiniert mit einer 2. Wärmequelle fällt die Reduktion der JAZ im Vergleich mit den Varianten ohne Erdsondenfeld etwas geringer aus. Die Regeneration des Erdsondenfelds durch Wärmeüberschüsse aus der zweiten Wärmequelle hilft offenbar, die mittlere Austrittstemperatur auch bei mehrjähriger Belastung der Sonden (50 Jahre) zu halten.

Figur 17: Jahresarbeitszahlen der untersuchten Systemkombinationen bei Erdsondenfeldern

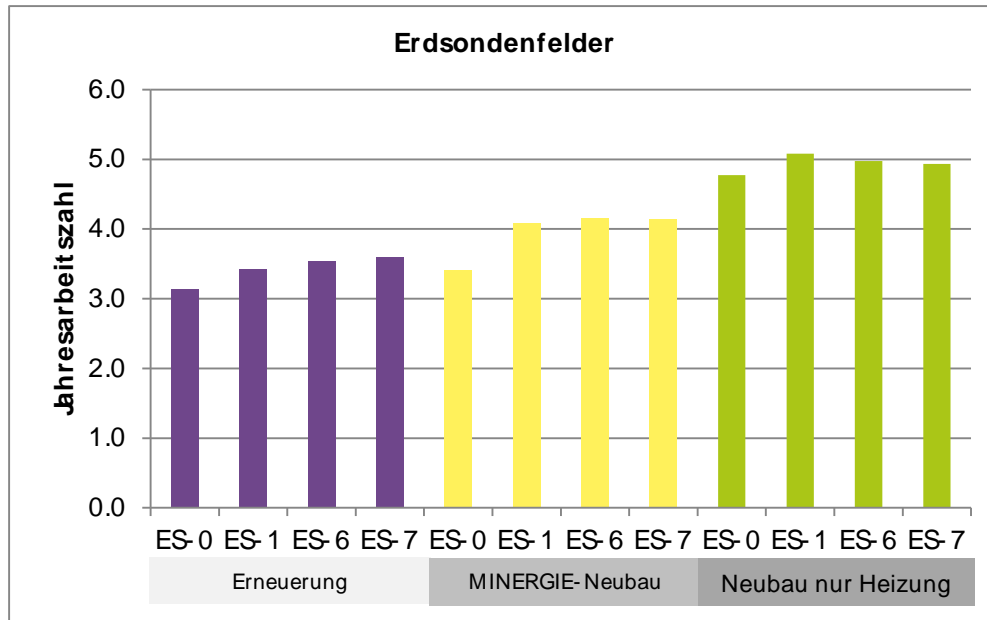


Tabelle 3 Übersicht der Eingabedaten und Ergebnisse der mit Polysun simulierten Varianten

System-kombination	Gebäudetyp	Tvl,H °C	Tww °C	Erdsonden- länge m	Anz. Sonden Stk	Länge pro Sonde m/Stk	Sonden- abstand m	Belastungs- dauer Jahre	Kollektor- grösse m2	Kollektor- neigung ° deg	JAZ Verdichter -	JAZ Anlage -	Strombedarf WP kWh	Betriebs- stunden WP h/a	Leistung Quellenpumpe W	Strombedarf Quellenpumpen kWh	Netto-Entzug Erdsonde kWh	Austritt in Betrieb °C	Ertrag 2. Quelle kWh	Austritt in Betrieb °C
MFH Erneuerung																				
AUL-0	Erneuerung	50	55						0	0	2.96	2.96	19'518	1'545	-	0			-	
AUL-6	Erneuerung	50	55						80	0	3.26	3.23	17'957	1'500	100	150			11'432	
ES-0	Erneuerung	50	55	527	3	176	9	50	0	0	3.43	3.31	16'645	1'448	400	579	40'198	4.2	-	
ES-1	Erneuerung	50	55	527	3	176	9	50	0	0	3.60	3.43	15'984	1'347	500	808	27'400	11.2	13'942	12.20
ES-6	Erneuerung	50	55	527	3	176	9	50	80	0	3.83	3.61	14'335	1'201	500	901	5'906	14.3	34'557	14.30
ES-7	Erneuerung	50	55	527	3	176	9	50	80	45	3.85	3.60	15'020	1'266	500	1013	1'440	15.0	41'136	16.00
AW-0	Erneuerung	50	55						0	0	4.25	4.18	14'070	1'321	200	264			45'750	23.40
MFH MINERGIE-Neubau																				
AUL-0	MINERGIE-Neubau	35	55								3.57	3.57	8'750	1'743	-	0			-	
AUL-6	MINERGIE-Neubau	35	55						40	0	3.93	3.85	8'050	2'056	75	154			9'474	
ES-0	MINERGIE-Neubau	35	55	319	2	159	8	50			4.15	3.92	7'791	1'537	300	461	24'361	4.6	-	
ES-1	MINERGIE-Neubau	35	55	319	2	159	8	50			4.47	4.09	7'023	1'333	400	640	12'180	12.0	11'842	12.9
ES-6	MINERGIE-Neubau	35	55	319	2	159	8	50	40	0	4.68	4.21	6'237	1'152	400	691	651	15.3	22'226	13.8
ES-7	MINERGIE-Neubau	35	55	319	2	159	8	50	20	45	4.71	4.21	6'232	1'146	400	733	1'351	15.1	21'630	14.4
AW-0	MINERGIE-Neubau	35	55								4.83	4.70	6'714	1'245	150	187			25'700	23.8
MFH Neubau nur Heizung																				
AUL-0	Neubau nur Heizung	35	-						0	0	4.10	4.10	3'931	1'187	-	0			-	
AUL-6	Neubau nur Heizung	35	-						12	0	4.51	4.44	3'970	1'204	50	60			6'210	
ES-0	Neubau nur Heizung	35	-	170	1	170	9	50	0	0	5.53	4.92	2'546	1'585	200	317	11'393	3.4	-	
ES-1	Neubau nur Heizung	35	-	170	1	170	9	50	0	0	6.11	5.16	2'259	1'387	250	416	3'426	13.2	7'861	13.7
ES-6	Neubau nur Heizung	35	-	170	1	170	9	50	12	0	6.27	5.10	2'048	1'261	250	473	-280	14.4	10'870	12.5
ES-7	Neubau nur Heizung	35	-	170	1	170	9	50	10	45	6.40	5.13	2'101	1'301	250	520	-186	14.6	11'260	15.7
AW-0	Neubau nur Heizung	35	-						0	0	6.60	6.26	2'568	1'392	100	139			14'292	24.1
Erdsondenfelder																				
ES-0	Erneuerung	50	55	527	16	33	3.3	50	0	0	3.24	3.14	17'644	1'428	400	571	40'400	-0.8	-	
ES-1	Erneuerung	50	55	527	16	33	3.3	50	0	0	3.59	3.42	16'137	1'363	500	818	28'875	11.3	12'477	12.6
ES-6	Erneuerung	50	55	527	16	33	3.3	50	80	0	3.76	3.54	15'337	1'289	500	967	7'221	12.6	34'965	14.3
ES-7	Erneuerung	50	55	527	16	33	3.3	50	80	45	3.84	3.60	15'023	1'263	500	1010	-1'177	13.6	43'534	14.3
ES-0	MINERGIE-Neubau	35	55	319	9	35	3.5	50	0	0	3.60	3.41	8'297	1'607	300	482	21'899	-0.6	-	
ES-1	MINERGIE-Neubau	35	55	319	9	35	3.5	50	0	0	4.45	4.08	7'042	1'339	400	643	12'385	12.0	11'585	12.9
ES-6	MINERGIE-Neubau	35	55	319	9	35	3.5	50	40	0	4.61	4.15	6'302	1'171	400	703	-2'184	14.3	24'834	13.6
ES-7	MINERGIE-Neubau	35	55	319	9	35	3.5	50	20	45	4.63	4.14	6'309	1'170	400	749	685	14.9	21'993	13.9
ES-0	Neubau nur Heizung	35	-	170	4	43	4.3	50	0	0	5.33	4.77	2'689	1'559	200	312	11'680	1.2	-	
ES-1	Neubau nur Heizung	35	-	170	4	43	4.3	50	0	0	6.02	5.08	2'264	1'397	250	419	1'726	12.5	9'320	13.2
ES-6	Neubau nur Heizung	35	-	170	4	43	4.3	50	12	0	6.13	4.97	2'053	1'273	250	477	-2'156	13.5	12'372	12.1
ES-7	Neubau nur Heizung	35	-	170	4	43	4.3	50	10	45	6.15	4.93	2'059	1'273	250	509	-1'221	13.0	11'458	12.6

6 Wirtschaftlichkeit

6.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung erfolgt nach den Richtlinien der Stadt Zürich und auf der Grundlage des Excel-Tools des Amts für Hochbauten. Die Annahmen zu Kalkulationszins und Kostensteigerung von Wartungskosten und Energiepreisen sind in Kap. 3.7 beschrieben.

Die Investitionskosten für die einzelnen Anlagen und Komponenten werden mit folgenden spezifischen Kennzahlen abgeschätzt:

Luft/Wasser Wärmepumpe	900	CHF/kW
Sole/Wasser Wärmepumpe	700	CHF/kW
Erdsonden	110	CHF/m
Solar-Luftkollektor	300	CHF/m ²
Unverglaster Solarkollektor	150	CHF/m ²
Verglaster Solarkollektor	800	CHF/m ²
Trockenkühler	600	CHF/kW
Wärmeübertrager (Abwärme)	600	CHF/kW

Die Investitions- und Betriebskosten für die Anlagen und Komponenten auf der Wärmeabgabeseite (Warmwasserspeicher, Pufferspeicher, Verteilleitungen, Pumpen, Regelung etc.) werden aus der Wirtschaftlichkeitsrechnung ausgeklammert, da diese für alle Varianten identisch sind.

Für Erdsonden wird eine technische Lebensdauer von 50 Jahren, für verglaste Solarkollektoren eine Lebensdauer von 25 Jahren angenommen. Alle übrigen Anlagen und Komponenten haben eine Lebensdauer von 15 Jahren.

Die jährlichen Wartungs- und Unterhaltskosten für Erdsonden und Solaranlagen werden pauschal auf 100 CHF pro Jahr veranschlagt. Für alle übrigen Anlagen und Komponenten gelten jährliche Wartungs- und Unterhaltskosten von 1% der Investitionskosten.

Für den Elektrizitätsbedarf der Wärmepumpe wird ein Mitteltarif von 15.6 Rp./kWh angesetzt (je 50% Hochtarif (18.8 Rp./kWh) und 50% Niedertarif (12.3 Rp./kWh)). Dieser Tarif beinhaltet bereits einen Umweltzuschlag von 5 Rp./kWh.

6.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind in [Tabelle 4](#) dargestellt. Danach ist keine der untersuchten Varianten im Vergleich zur entsprechenden Basisvariante (reine Luft/Wasser (AUL-0) oder reine Sole/Wasser (ES-0) Wärmepumpe) bei den heute geltenden Stromtarifen wirtschaftlich. Förderbeiträge des ewz-Stromsparerfonds für Wärmepumpen und Solaranlagen sind in der Berechnung noch nicht berücksichtigt.

Die beiden Systemkombinationen, mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis sind die Luft/Wasser-Wärmepumpe im Kombination mit einem Solar-Luftkollektor (AUL-6) und eine Sole/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einem unverglasten Solarkollektor (ES-6).

Die Wärmegestehungskosten liegen je nach Variante und Gebäudetyp im Bereich von 11 – 36 Rp./kWh. Die Kosten pro eingesparte Elektrizität liegen mit einer Ausnahme im Bereich von 80 bis zu über 600 Rp./kWh. Eine Investition in Photovoltaik ist somit in der Regel wirtschaftlicher.

Die Wirtschaftlichkeit von Variante ES-6 kann im Vergleich zu ES-0 optimiert werden, indem die Länge der Erdsonden verkürzt wird, bis die JAZ der beiden Systeme vergleichbar ist. Im Fall des MFH MINERGIE-Neubau können z.B. die beiden Erdsonden von 159 auf 80 m verkürzt werden. Die JAZ liegt dann wie bei ES-0 bei ca. 3.90, die Jahreskosten sind vergleichbar und die Investitionskosten gut 10% tiefer als bei ES-0.

Tabelle 4 Wirtschaftlichkeitsrechnung für die in Polysun simulierten Varianten

System- kombination	Gebäudetyp	Kosten	Kosten	Kosten	Kosten	Kosten	Total	Kapital-	Wartungs-	Energie-	Total jährl.	Wärmege-	Mehrkosten zu	Kosten
		WP	Erdsonde	Solarkollektor	Trockenkühler / Wärmeübertr.	Hydraulik, Regelung	Investition	kosten	kosten	kosten	Kosten (50 a)	stehungskosten	Basisvariante	eingesparte Elektrizität
		CHF	CHF	CHF	CHF	CHF	CHF	CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF/a	CHF/kWh	CHF/a	CHF/kWh
MFH Erneuerung														
AUL-0	Erneuerung	27'000					27'000	2'181	270	3'035	6'272	0.11	-	-
AUL-6	Erneuerung	27'000		24'000		4'000	55'000	4'442	410	2'816	8'435	0.14	2'163	0.11
ES-0	Erneuerung	21'000	58'000			4'000	83'000	4'064	350	2'678	7'813	0.14	-	-
ES-1	Erneuerung	21'000	58'000		18'000	16'000	113'000	6'487	650	2'611	10'524	0.18	2'711	4.10
ES-6	Erneuerung	21'000	58'000	12'000		16'000	107'000	6'003	570	2'369	9'641	0.18	1'828	0.79
ES-7	Erneuerung	21'000	58'000	64'000		16'000	159'000	10'202	570	2'493	13'994	0.24	6'181	3.80
AW-0	Erneuerung	21'000			18'000	4'000	43'000	3'473	430	2'229	6'765	0.11	-	-
MFH MINERGIE-Neubau														
AUL-0	MINERGIE-Neubau	18'000					18'000	1'454	180	1'361	3'361	0.11	-	-
AUL-6	MINERGIE-Neubau	18'000		12'000		4'000	34'000	2'746	320	1'276	4'722	0.15	1'361	1.94
ES-0	MINERGIE-Neubau	14'000	35'000			4'000	53'000	2'688	280	1'283	4'623	0.14	-	-
ES-1	MINERGIE-Neubau	14'000	35'000		12'000	16'000	77'000	4'626	520	1'192	6'745	0.22	2'122	2.76
ES-6	MINERGIE-Neubau	14'000	35'000	6'000		16'000	71'000	4'142	500	1'077	6'094	0.21	1'471	0.95
ES-7	MINERGIE-Neubau	14'000	35'000	16'000		16'000	81'000	4'949	500	1'083	6'909	0.24	2'286	1.47
AW-0	MINERGIE-Neubau	14'000			12'000	4'000	30'000	2'423	300	1'073	4'123	0.13	-	-
MFH Neubau nur Heizung														
AUL-0	Neubau nur Heizung	13'500					13'500	1'090	135	611	2'014	0.12	-	-
AUL-6	Neubau nur Heizung	13'500		3'600		4'000	21'100	1'704	275	627	2'821	0.16	806	0.21
ES-0	Neubau nur Heizung	10'500	19'000			4'000	33'500	1'841	245	445	2'695	0.19	-	-
ES-1	Neubau nur Heizung	10'500	19'000		9'000	16'000	54'500	3'537	455	416	4'615	0.33	1'920	6.69
ES-6	Neubau nur Heizung	10'500	19'000	1'800		16'000	47'300	2'956	465	392	4'017	0.31	1'321	2.65
ES-7	Neubau nur Heizung	10'500	19'000	8'000		16'000	53'500	3'456	465	408	4'537	0.34	1'841	4.14
AW-0	Neubau nur Heizung	10'500			9'000	4'000	23'500	1'898	235	421	2'710	0.16	-	-
Erdsondenfelder														
ES-0	Erneuerung	21'000	58'000			4'000	83'000	4'064	350	2'833	8'004	0.14	-	-
ES-1	Erneuerung	21'000	58'000		18'000	16'000	113'000	6'487	650	2'636	10'556	0.18	2'552	1.69
ES-6	Erneuerung	21'000	58'000	12'000		16'000	107'000	6'003	570	2'535	9'847	0.17	1'843	0.80
ES-7	Erneuerung	21'000	58'000	64'000		16'000	159'000	10'202	570	2'493	13'995	0.24	5'991	2.29
ES-0	MINERGIE-Neubau	14'000	35'000			4'000	53'000	2'688	280	1'365	4'724	0.16	-	-
ES-1	MINERGIE-Neubau	14'000	35'000		12'000	16'000	77'000	4'626	520	1'195	6'749	0.22	2'025	1.61
ES-6	MINERGIE-Neubau	14'000	35'000	6'000		16'000	71'000	4'142	500	1'089	6'109	0.21	1'385	0.69
ES-7	MINERGIE-Neubau	14'000	35'000	16'000		16'000	81'000	4'949	500	1'097	6'927	0.24	2'202	1.11
ES-0	Neubau nur Heizung	10'500	19'000			4'000	33'500	1'841	245	467	2'722	0.19	-	-
ES-1	Neubau nur Heizung	10'500	19'000		9'000	16'000	54'500	3'537	455	417	4'617	0.34	1'895	4.46
ES-6	Neubau nur Heizung	10'500	19'000	1'800		16'000	47'300	2'956	465	393	4'018	0.32	1'296	2.04
ES-7	Neubau nur Heizung	10'500	19'000	8'000		16'000	53'500	3'456	465	399	4'526	0.36	1'804	2.86

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Schlussfolgerungen

- Die Jahresarbeitszahl (JAZ) von Wärmepumpenanlagen kann durch die Kombination von einzelnen Erdsonden mit Solarkollektoren um bis zu 9% erhöht werden. Dabei müssen die Erdsonden mit genügend grossem Abstand ohne gegenseitige Beeinflussung angeordnet werden (z.B. Anordnung in einer Reihe, Sondenabstand > 8 m).
- Mit der Kombination von Luft/Wasser-Wärmepumpen mit einem Solar-Luftkollektor kann die JAZ um bis zu 8% gesteigert werden.
- Ideal sind Systeme, bei welchen die Quellentemperatur vor allem im Winter angehoben werden kann, z.B. durch Nutzung von Abwärme aus Fortluft, Abwasser, Industrie und Gewerbe. Die Idealvariante führt bei einer Wärmequelle mit konstant 24°C zu einer maximalen Steigerung der JAZ um 27%.
- Bei Erdsondenfeldern kann die JAZ durch die Einlagerung von Solargewinnen (oder Abwärme aus der Klimakälte) um bis zu 22% erhöht werden. Entscheidend ist hier, wie stark bei der Basisvariante das Temperaturniveau im Erdsondenfeld ohne Nachladung abgesenkt wird. Das heisst je grösser das Erdsondenfeld und je kleiner der Sondenabstand, desto eher lohnt sich eine Nachladung durch überschüssige Wärme aus Solarkollektoren oder Abwärme aus dem Gebäude.
- Anlagen mit Erdsonden ohne gegenseitige Beeinflussung sind aber bei den untersuchten Gebäudetypen insgesamt effizienter als Erdsondenfelder mit solarer Nachladung. Das bedeutet, dass die aktive Nachladung von Erdsonden mit Solarwärme vor allem dort interessant ist, wo aus Platzmangel dichte Erdsondenfelder anstelle von Einzelsonden mit möglichst geringer gegenseitiger Beeinflussung zum Einsatz kommen.
- Keine der untersuchten Varianten mit kombinierter Wärmequelle ist im Vergleich zur Basisvariante mit nur einer primären Wärmequelle wirtschaftlich. Dabei sind allerdings eventuell verfügbare Förderbeiträge für Wärmepumpen und Solaranlagen noch nicht berücksichtigt.
- Die geringsten Mehrkosten im Vergleich zur jeweiligen Basisvariante weisen Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Solar-Luftkollektoren (AUL-6) und Solar/Wasser-Wärmepumpen mit unverglasten Solarkollektoren (ES-6) auf.
Die Mehrkosten für unverglaste Solarkollektoren können aber durch eine Reduktion der Erdsondenlänge kompensiert werden. Damit lassen sich bei geringeren Investitionskosten die gleichen Jahresarbeitszahlen wie bei der Basisvariante ohne Solarkollektoren realisieren.

7.2 Vergleich mit anderen Studien

Die Kombinierte Nutzung von Wärmepumpen und Solaranlagen ist ein boomendes Forschungsthema, dem sich bereits seit Anfang 90er Jahre zahlreiche Forschungsprojekte gewidmet haben. Aus den vielen Berichten und Artikeln zum Thema soll hier nur punktuell auf zwei eingegangen werden.

Die Studie von Kjellsson E., et al. [7] hat die Jahresarbeitszahl von verschiedenen Systemkombinationen von Erdsonden-Wärmepumpen mit Solaranlagen mittels TRNSYS-Simulationen ermittelt. Untersucht wurde ein Einfamilienhaus in Schweden. Bei knapp dimensionierten Erdsonden mit einem spezifischen jährlichen Wärmeentzug von > 180 kWh/m führt sowohl die alleinige Nutzung der Solarwärme zur Regeneration der Erdsonde als auch die kombinierte Nutzung zur direkten Warmwassererzeugung im Sommer und zur Regeneration der Erdsonde im Winter zu einer vergleichbaren Verbesserung der Jahresarbeitszahl, allerdings auf einem sehr tiefen Niveau (JAZ = 1.5 – 3.4). Bei grosszügiger dimensionierten Erdsonden (jährlicher Wärmeentzug < 180 kWh/m) ist der Unterschied zwischen den einzelnen Systemkombinationen bei Jahresarbeitszahlen von 3.4 – 3.6 vernachlässigbar.

In der Studie von Hadorn J.-C. [6] werden ebenfalls unterschiedliche Systemkombinationen für ein MINERGIE-Einfamilienhaus bezüglich der Wärmegestehungskosten verglichen. Die Wirtschaftlichkeit der kombinierten Solar-Wärmepumpen-Lösungen wird dabei im Vergleich zu reinen Luft/Wasser- oder Erdsonden-Wärmepumpen mit 1.5 – 2-fach höheren Wärmegestehungskosten eher kritisch beurteilt.

Die Ergebnisse der beiden Studien können aufgrund unterschiedlicher Gebäudetypen und Klimazonen nicht direkt mit der vorliegenden Studie verglichen werden. Drei grundsätzliche Tendenzen werden aber bestätigt:

- Bei grosszügig dimensionierten Erdsondenanlagen mit Einzelsonden lässt sich die Jahresarbeitszahl durch die Kombination mit Solaranlagen nur marginal erhöhen.
- Der Energiebedarf der zusätzlichen Pumpen und oder Ventilatoren bei mehreren Wärmequellen kann die Effizienzgewinne der Wärmepumpe empfindlich reduzieren oder sogar überkompensieren.
- Die Kombination mehrerer Wärmequellen ist im Vergleich zu reinen Luft-Wasser- oder Erdsonden-Wärmepumpen bei heutigen Strompreisen nicht wirtschaftlich.

7.3 Empfehlung für ein Pilotprojekt

Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Studie erscheint die Kombination von grossen Erdsondenfeldern mit unverglasten Niedertemperatur-Solarkollektoren besonders interessant. Die solare Nachladung ermöglicht dabei das Erdsondenfeld kleiner zu dimensionieren und so die Mehrkosten für die Solarkollektoren zu kompensieren. Die hydraulische Schaltung und Bewirtschaftung der beiden Wärmequellen könnte im Rahmen des Pilotprojekts weiter optimiert und im Betrieb konkrete Erfahrungen für eine breitere Anwendung dieser Lösung gesammelt werden. Bei tiefen Vorlauftemperaturen auf der Wärmeabgabeseite müsste dafür der Einsatz einer Niedrighub-Wärmepumpe geprüft werden, welche heute noch nicht standardmässig auf dem Markt verfügbar ist [4].

7.4 Weitere Massnahmen zur Optimierung von Wärmepumpenanlagen

Nicht Gegenstand dieser Studie sind die folgenden Massnahmen mit einem hohen Effizienzpotential und Innovationsgrad:

- Kombination von Wärmepumpen mit Solaranlagen, welche die Solarwärme je nach verfügbarem Temperaturniveau sowohl auf der Wärmequelle als auch auf der Wärmeabgabeseite, insbesondere für die Warmwassererzeugung, nutzen. Diverse Hersteller bieten bereits kompakte Anlagen dieses Typs an. Die IEA untersucht im Rahmen des Task 44 des Solar Heating and Cooling Programms solche Lösungen [5].
- Reduktion der erforderlichen Warmwassertemperatur auf 45°C, z.B. durch den Einsatz von Frischwasserstationen oder chemischer Wasserbehandlung
- Optimierung der hydraulischen und regeltechnischen Einbindung der Wärmepumpe ins Gesamtsystem.

7.5 Erfahrungen mit Polysun

Die Erfahrungen mit dem Programm Polysun zeigen, dass die Erstellung von eigenen Anlagenschemen, die korrekte Programmierung der Regeleinheiten und die Validierung der Ergebnisse sehr zeitintensiv sind. Trotz intensiver Systemanalyse, zahlreicher Optimierungsvarianten und permanentem Support durch die Programmentwickler sind die untersuchten Systemkombinationen zur Erhöhung der Quellentemperatur von Wärmepumpen bez. der möglichen Steigerung der Jahresarbeitszahl vermutlich noch nicht ausgereizt. Gleichzeitig wird gerade durch die Komplexität des Simulationsmodells deutlich, dass die angestrebte Anlagenoptimierung nicht trivial ist und die Umsetzung in reale Anlagen mit optimaler Regelung in allen möglichen Betriebszuständen eine grosse Herausforderung darstellt. Dies

deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus diversen Feldtests, wonach besonders Wärmepumpenanlagen mit komplexer Hydraulik oft hinter den Erwartungen an die Jahresarbeitszahl zurückbleiben.

Besonders zeitintensiv ist die Simulation der Erdsondenanlagen, welche zur Berücksichtigung des langfristigen Temperaturniveaus jeweils über 50 Jahre simuliert wird. Unsicherheiten bezüglich der Genauigkeit der Ergebnisse bestehen insbesondere beim Gütegrad der Wärmepumpen bei tiefem Temperaturhub. Vermutlich wird durch die Extrapolation aus den gemessenen Stützstellen der Gütegrad bei Temperaturhüben < 20 K tendenziell unterschätzt. Allerdings wiesen die meisten heute auf dem Markt verfügbaren Wärmepumpen in diesem Bereich effektiv reduzierte Gütegrade im Bereich von 30 – 35% auf.

8 Anhang – Abschätzung der JAZ mit WPEsti

Für die Berechnung des Jahresnutzungsgrads könnte alternativ zu Polysun auch auf der Grundlage des durch Kantone und MINERGIE geförderten „WPEsti“-Tools erfolgen. Damit die erhöhten Quellentemperaturen berücksichtigt werden können, musste das WPEsti Tool durch den Programmentwickler (A. Huber, Huber Energietechnik AG) im Rahmen des vorliegenden Projekts erweitert werden. Der vereinfachte Ansatz beruht auf einem Temperaturoffset, welcher für die definierten Stützstellen der Wärmepumpencharakteristik je nach Kombination der Wärmequellen eingegeben werden kann.

Figur 18: Erweiterung der Programmoberfläche von WPEsti zur Berücksichtigung erhöhter Wärmequellentemperaturen anhand eines Temperatur-Offsets auf den Stützstellen

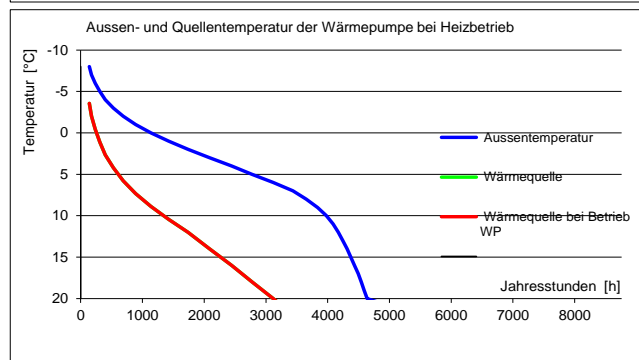
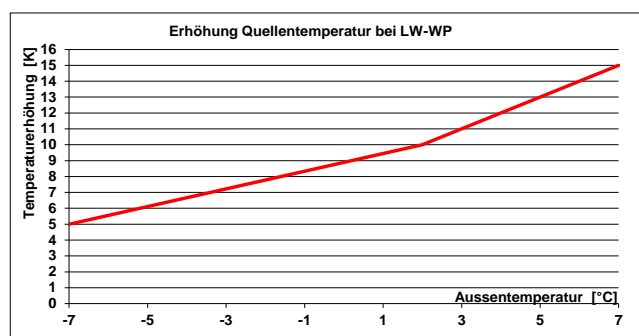
Erhöhung der Quellentemperatur bei Luft-Wasser - Wärmepumpen

Erhöhung Lufttemperatur bei Luft-Wasser-WP im Heizbetrieb

ΔT bei -7°C (A-7/W35)	5.0 K	Heizung
ΔT bei 2°C (A2/W35)	10.0 K	Heizung
ΔT bei 7°C (A7/W35)	15.0 K	Heizung

Erhöhung Lufttemperatur bei Luft-Wasser-WP im WW-Betrieb

ΔT bei 7°C (A7/W50)	10.0 K	WW
---	---------------	----



Anteil und JAZ der Wärmepumpe für die Heizung	$\epsilon =$	99.2%	$\text{JAZ}_h =$	3.19
Anteil und JAZ der Wärmepumpe für Warmwasser	$\epsilon =$	100.0%	$\text{JAZ}_{ww} =$	3.58

Ob sich dieses vereinfachte Verfahren für den Zweck dieser Studie eignet, muss noch durch den Vergleich mit Ergebnissen aus den Simulationen mit Polysun überprüft werden. Zudem muss ein einfaches Verfahren zur Ableitung der Temperatur-Offsets anhand der kombinierten Quellentemperatur gemäss Absatz 3.4 entwickelt werden.

Falls der vereinfachte Ansatz mit WPEsti keine hinreichend genaue Abschätzung des Jahresnutzungsgrads erlauben sollte, könnte alternativ auch eine vereinfachte Berechnung auf der Grundlage des stündlichen Berechnungsverfahrens nach SIA MB 2044 gemacht werden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Primas A., Stache M., Niedertemperatur Wärmeverteilsysteme – Systemevaluation für die Instandsetzung, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, 2011
- [2] Prüfergebnisse Luft/Wasser, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-Wärmepumpen basierend auf der EN 14511, Wärmepumpen-Testzentrum, WPZ Buchs, www.wpz.ch
- [3] Wysser I., et al., Effizientes Heizen und Kühlen mit Niedrighub-Anlagen, 16. Status-Seminar „Forschen und Bauen im Kontext von Energie und Umwelt“, 2010
- [4] AHB Variantenvergleich Energiesysteme V01, Excel Tool, Stadt Zürich Amt für Hochbauten, 2011
- [5] IEA Task 44, Solar and Heat Pump Systems, www.iea-shc.org/task44
- [6] Hadorn J.-C., Solar and Heat Pump Systems – Analysis of several combinations for a low energy house, BASE consultants SA, 2010
- [7] Kjellsson E., et al., Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings, Energy (2009)/ j.energy.2009.04.011
- [8] Bertram E., et al., Condensation heat gains on unglazed solar collectors in heat pump systems, UMSSy, Deutsche Bundestiftung Umwelt (FN 21098), 2008
- [9] SIA 385/1, Warmwasserversorgung für Trinkwasser in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2011