

Untersuchung von Heizkonzepten für die Reihenhaussiedlung am Bacheggliweg in Winterthur und deren physikalische Modellierung



Corvin Sydow

Klasse 6bG, Kantonsschule Rychenberg Winterthur

Betreuung: Matias Meier Trüllinger

Zweitbeurteilung: Michael Oettli

Abgegeben am 06.12.2022

Abstract

Titel: Untersuchung von Heizkonzepten für die Reihenhaussiedlung am Bacheggliweg in Winterthur und deren physikalische Modellierung

Verfasser: Corvin Sydow

Die zehn Häuser einer Reihenhaussiedlung am Bacheggliweg in Winterthur teilen sich derzeit eine gemeinsame Ölheizung, die in den nächsten Jahren durch eine klimaverträgliche Alternative ersetzt werden muss. Diese Arbeit untersucht mögliche Nachfolgekonzepte. Dazu wurden verschiedene Heizungssysteme untersucht, theoretische Grundlagen erarbeitet und ein physikalisches Modell der Siedlung aufgestellt. Als Kernstück der Arbeit wurde für die drei in Frage kommenden Heizkonzepte Luft-Wärmepumpe, Erdsonde-Wärmepumpe und Pelletheizung berechnet, wie viel Strom bzw. Pellets diese jährlich benötigen würden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
2 Ausgangslage	11
2.1 Ziele und Anforderungen eines Heizungsersatzes	11
2.2 Umfrage unter den Bewohnern	12
2.3 Unterschiede der Siedlung zu einem Neubau	13
3 Technische und Physikalische Grundlagen	15
3.1 Wärmebilanz eines Hauses	15
3.2 Aufbau einer Zentralheizung	16
3.3 Vorlauftemperatur und Heizkurve	16
3.4 Wärmepumpen	17
4 Vorstellung der Heizkonzepte	19
4.1 Luft-Wärmepumpe	19
4.2 Erdsonde-Wärmepumpe	20
4.3 Holzpellettheizung	23
4.4 Photovoltaik für Wärmepumpen	24
4.5 Bivalente Systeme	25
5 Modellierung der Parameter	27
5.1 Jährlicher Energiebedarf der Siedlung	27
5.2 Vorlauftemperatur der Heizung	28
5.3 Reservoirtemperatur von Erdsonden	29
5.4 Verhalten der Wärmepumpen	29
5.5 Eigenschaften von Holzpellets	30
5.6 Aussentemperaturen	31
6 Berechnung des Energiebedarfs der Heizkonzepte	33
6.1 Bedarf an Holzpellets	33
6.2 Vorgehen bei Wärmepumpenheizungen	34
6.3 Benötigte Heizleistung bei einer gegebenen Temperatur	35
6.4 Strombedarf Erdsonde-Wärmepumpe	36
6.5 Strombedarf Luft-Wärmepumpe	38
7 Auswertung	41
8 Schlusswort	43

1 Einleitung

Das Heizen ist 2022 ein viel diskutiertes Thema. Hintergrund sind einerseits der Klimawandel und der Weg zu Netto-Null, andererseits die Abhängigkeit von ausländischen Energieträgern und die in Folge des Ukraine-Kriegs gestiegenen Energiepreise.

Wie in Abbildung 1 zu sehen, ist das Heizen mit fossilen Energieträgern für 23% der schweizweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Der Kanton Zürich gibt den Anteil von Öl- und Gasheizungen an den CO₂-Emissionen sogar mit 40% an (Kanton Zürich 2021, S. 4). In diesem Bereich liegt ein grosses Potential, den Ausstoss von Treibhausgasen zu senken, was Politik und Gesellschaft mittlerweile erkannt haben.

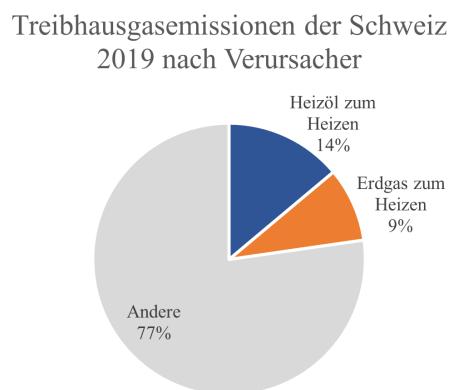


Abbildung 1: Anteil von Heizöl und Erdgas zu Heizzwecken an den Treibhausgasemissionen der Schweiz 2019¹ Zahlen und Methodik: (Bundesamt für Umwelt 2022)

Deshalb hat der Kanton Zürich im Jahr 2021, nachdem es in einer Volksabstimmung gutgeheissen wurde, ein neues Energiegesetz eingeführt, damit fossile Heizungen am Ende ihrer Lebensdauer durch klimafreundliche Alternativen ersetzt werden. Dort heisst es: „Werden Wärmeerzeuger in bestehenden Bauten ersetzt, müssen ausschliesslich erneuerbare Energien eingesetzt werden, wenn dies a) technisch möglich ist und b) die Lebenszykluskosten um höchstens 5% erhöht.“

Der andere Grund für die Aktualität der Thematik ist die Energiekrise in Europa. Infolge des russischen Überfalls auf die Ukraine und der darauf folgenden Sanktionen ist der Import von Erdöl, Gas und Kohle aus Russland vorerst nicht mehr denkbar. Im Herbst 2022 ging die Angst vor Stromengpässen um und die Preise aller Energieträger sind kurzfristig massiv gestiegen, wie Abbildung 2 illustriert. Angesichts dieser Verwerfungen möchte man die Abhängigkeit von Energieimporten reduzieren und sucht nach Lösungen, wie der Wärmebedarf im Winter ohne fossile Energieträger gedeckt werden kann. Die gestiegenen Energiekosten haben die Situation auf dem Heizungsmarkt deutlich verändert.

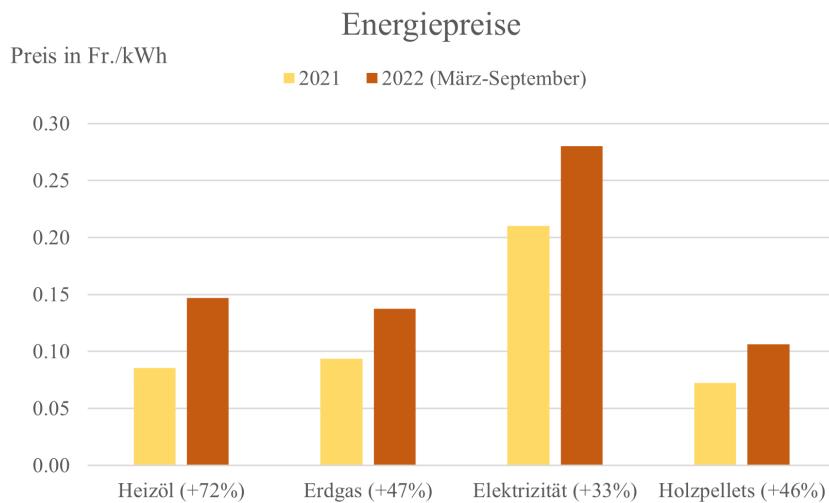


Abbildung 2: Anstieg der Energiepreise 2022

Strompreise: (Stadtwerk Winterthur 2022b) Übrige Preise: (Hauseigentümerverband Schweiz 2022)

Vor diesem Hintergrund steht in den nächsten Jahren ein Heizungsersatz in unserer Reihenhaussiedlung an. Bisher wurden die zehn Häuser von einem gemeinsamen Ölkessel aus beheizt, der in den nächsten Jahren ausgetauscht werden muss. Gegenstand dieser Masterarbeitsarbeit wird es sein, mögliche Nachfolgekonzepte zu untersuchen. Die Siedlung liegt in Winterthur Seen am Bacheggliweg und umfasst die Häuser 13a-d, 15ab und 21a-d. Wie man auf dem Luftbild in Abbildung 3 sieht, sind sie in drei Blöcken als Reihenhäuser angeordnet. In der Siedlung wohnen etwa 30 Personen. Manche davon leben schon seit dem Bau der Siedlung 1978 dort. Die heutige Ölheizung kann maximal bis 2030 in Betrieb sein.



Abbildung 3: Luftbild der betrachteten Siedlung Quelle: Eigenes Foto

Die Frage nach einem neuen Heizkonzept wird in dieser Maturitätsarbeit untersucht. Dabei wird zunächst die Ist-Situation analysiert (Kapitel 2). Dazu werden verfügbare Daten zur Ölheizung, so etwa die monatlichen Ölverbräuche, herbeigezogen, sowie eine Umfrage unter den Bewohnern durchgeführt. Technische und physikalische Grundlagen, die für die Arbeit relevant sind, werden mithilfe der Fachliteratur erarbeitet (Kapitel 3).

Als Informationsquellen zur weiteren Behandlung des Themas stehen Fachliteratur und das Internet zur Verfügung. Weiterhin habe ich eine Informationsveranstaltung von Stadtwerk Winterthur besucht und ein Gespräch mit Bernard Dubochet von der Energieberatung Winterthur geführt.

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf drei Heizkonzepten: Luft-Wärmepumpe, Erdsonde-Wärmepumpe und Pelletheizung. Diese werden in Kapitel 4 vorgestellt. Andere Heizlösungen, die für die vorliegende Überbauung aus unterschiedlichen Gründen nicht geeignet sind, werden im Anhang behandelt. Als Kernstück der Arbeit soll für jedes der drei Heizkonzepte abgeschätzt werden, wie viel Strom bzw. Pellets für die vorliegende Reihenhausüberbauung jährlich benötigt würden. Dazu wird ein physikalisches Modell der Siedlung aufgestellt und ausgewertet. Um die Parameter zu bestimmen, sind weitere Recherchen notwendig, beispielsweise zum Klima in Winterthur (Kapitel 5). Für die drei Heizungstypen wird das Modell jeweils mit ungünstigen, erwarteten und bestmöglichen Parametern ausgewertet (Kapitel 6). Daraus ergibt sich eine Bandbreite, in die der Energiebedarf fallen wird. Abschliessend werden die Ergebnisse bezüglich Verlässlichkeit beurteilt und in Relation zueinander und zu anderen Häusern gesetzt (Kapitel 7).

Die Arbeit soll einen möglichst umfassenden Überblick zum Thema Heizkonzepte bieten. Gleichzeitig liegt der Fokus aber immer auf den Reihenhäusern am Bachegglweg. Eine abschliessende Empfehlung wird sich jedoch nicht aussprechen lassen, da sich die Kosten für den Einbau einer neuen Heizung nur bestimmen lassen, indem man bei einem Anbieter eine Offerte einholt, was im Umfang dieser Maturitätsarbeit nicht möglich ist.

Persönlich habe ich dieses Thema gewählt, weil es vielfältige Fragestellungen aus mehreren Naturwissenschaften und Technik beinhaltet, über eine gewisse Aktualität verfügt und mich direkt betrifft.

2 Ausgangslage

Dieses Kapitel untersucht die Rahmenbedingungen, unter denen der Heizungsersatz angegangen wird und orientiert über die Gesichtspunkte, nach denen ein Heizkonzept für die Bachegglweg-Siedlung beurteilt werden soll.

2.1 Ziele und Anforderungen eines Heizungsersatzes

Für die Wahl eines neuen Heizungssystems müssen verschiedene Kriterien beachtet werden. Die wichtigsten sind dabei:

Kosten Bei der Beurteilung der Kosten für ein Heizsystem werden zwei Aspekte getrennt: Die *Investitionskosten* umfassen den Preis für die Anschaffung, Installation und Inbetriebnahme einer Heizung. Die *laufenden Kosten* sind die Kosten für Energie und Wartung. Eine Heizung, die hohe Investitionskosten hatte, kann diese durch tiefe laufende Kosten kompensieren, wenn sie mehrere Jahrzehnte lang in Betrieb ist.

Nachhaltigkeit Im Bezug auf das Heizen ist mit dem Begriff „Nachhaltigkeit“ in erster Linie der CO₂-Ausstoss gemeint. Diesen zu senken ist nicht nur aus persönlichen Gründen gewünscht, sondern wird auch finanziell gefördert.

Herkunft des Energieträgers Alle zum Heizen genutzten Energieträger weisen Nachteile bezüglich ihrer Quelle auf. Erdöl und Erdgas werden teilweise aus autokratisch regierten Staaten importiert. Elektrizität wird gerade im Winter unter anderem mit Kohle- und Kernkraftwerken bereitgestellt. Selbst die von unmittelbar unter dem Haus bezogene Erdwärme hat einen Nachteil: Wenn sie zu intensiv genutzt wird, kühlt sich das Erdreich ab und liefert nicht mehr genug Energie.

Versorgungssicherheit und Preisstabilität Von der Energiekrise im Winter 2022 sind Haushalte je nach Heizungstyp unterschiedlich stark betroffen. Die Angst, im Krisenfall frieren zu müssen, ist ein gewichtiges Argument. Da auf dem Grundstück durch Nutzung von Solarenergie nicht genug Energie gewonnen werden kann, sind Haushalte in jedem Fall von externen Quellen abhängig. Welche Energieträger in den nächsten 25 Jahren knapp werden, lässt sich derzeit nicht vorhersagen. Die aktuelle Krise zeigt, wie schnell sich die Verhältnisse verschieben können. In der Vergangenheit war bis 2021 (Bundesamt für Statistik 2022, S. 50) der Ölpreis den stärksten Schwankungen unterworfen, gefolgt vom Gas- und Holzpelletpreis, während der Strompreis vergleichsweise stabil blieb.

Aufwand für Umbau Die vorliegende Siedlung wird während der Umbauarbeiten bewohnt sein. Die Bauarbeiten werden Lärm verursachen und Zugangswege versperren. Für die Verlegung zusätzlicher Leitungen werden Gärten umgegraben werden müssen und die neue Heizung wird womöglich mehr Platz benötigen.

Beibehaltung der gemeinsamen Lösung Seit dem Bau 1978 teilen sich die Häuser der Siedlung die zentrale Heizung. Die Vorteile für jedes Haus sind ein geringerer Wartungs-

aufwand und günstigere Bedingungen für den Heizölkauf. Mit dem kommenden Umbau stellt sich auch die Frage, ob dies weitergeführt werden wird. Sollte keine gemeinschaftliche Lösung zustande kommen, wird jedes Haus eine individuelle Heizlösung suchen.

2.2 Umfrage unter den Bewohnern

Im Rahmen dieser Maturitätsarbeit haben die Bewohner der betrachteten Siedlung einen Fragebogen bekommen, den 9 von 10 Parteien beantwortet haben. Er ist im Anhang zu finden. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst:

1) „Wie dringend erscheint Ihnen ein Heizungsersatz?“

Die möglichen Antworten „Sollte noch diesen Winter angegangen werden“ (2x), „Abwarten, bis sich die Situation beruhigt hat“ (2x) und „Jetziges System möglichst lange am Laufen halten“ (3x) wurden ungefähr gleich oft gewählt.

2) „Haben Sie schon privat Recherche zum Thema betrieben (Ja/Nein)?“

6 von 9 haben schon privat recherchiert.

3) „Wie wichtig sind Ihnen folgende Kriterien bei der Wahl eines neuen Heizungstyps?“

	Nebensächlich					Sehr wichtig	
	1	2	3	4	5		
Günstigste Lösung		4	4	1			
Herkunft des Energieträgers*		1	3	2	1		
Unabhängigkeit & Versorgungssicherheit			1	3	5		
Tiefer CO2 - Ausstoss	1		1	4	3		
Aufwand für Umbau gering halten		1	7	1			
Beibehaltung der gemeinsamen Lösung für alle Häuser (statt jedes Haus für sich)		1	1	3	4		

* "Herkunft des Energieträgers" war zu vage definiert. 2 Haushalte haben hier ein ? gesetzt.

Abbildung 4: Antworten zur Frage „Wie wichtig sind Ihnen folgende Kriterien bei der Wahl eines neuen Heizungstyps?“. Die grün markierten Zahlen geben an, wie häufig das entsprechende Feld angekreuzt wurde. Quelle: Eigene Erhebung

Oberste Priorität haben demnach „Unabhängigkeit & Versorgungssicherheit“. Wert gelegt wird auch auf die Beibehaltung der gemeinsamen Lösung für alle Häuser, gefolgt von einem tiefen CO₂- Ausstoss. Dafür würden auch höhere Kosten in Kauf genommen. Als weitere Kriterien wurden Langfristigkeit (2x), Offenheit für neue Lösungen, eine robuste Lösung und die Situation (bezgl. Energieversorgung und Politik) zum Entscheidungszeitpunkt genannt.

4) „Könnten Sie sich vorstellen, wieder eine Ölheizung einzubauen?“

5 von 9 können sich nicht vorstellen, wieder eine Ölheizung einzubauen.

5) „Favorisieren Sie einen Heizungstyp? Sehen Sie einen Heizungstyp kritisch?“

Genannt wurden Erdsonden (4x), Fernwärme (2x) und Eisspeicher. Als kritisch wurden Luftwärmepumpen (2x) und Holzpellets (1x) gesehen. 3 Häuser haben keine Heizungstypen angegeben.

6) „Möchten Sie diesen Winter oder dauerhaft die Innentemperatur senken (um Energie zu sparen)?“

Die Antworten waren „Nein“ (3x), „Marginal“ (3x), „Haben bereits tiefe Temperatur“ (2x) und „um 1 - 2 °C“

7) „Haben Sie in den letzten Jahren (für die Heizung relevante) Umbauten durchgeführt?“

Genannt wurden „Dreifachverglasung“ (6x), „Dach neu gedeckt und Isolierung verbessert“ (4x) und „Heizkörperthermostate“ (3x). Manche Häuser haben (teils recht ausführlich) weitere Umbauten beschrieben.

2.3 Unterschiede der Siedlung zu einem Neubau

Weil die vorliegende Siedlung ein Altbau ist, sind die Möglichkeiten verglichen mit denen eines Neubaus eingeschränkt und es muss auf vorhandene Begebenheiten Rücksicht genommen werden. Dafür lässt sich die bestehende Infrastruktur weiter nutzen. So wird es etwa nicht erforderlich sein, neue Rohre für Heizwasser zu verlegen oder einen Kamin zu bauen. Relevant sind insbesondere folgende Punkte:

- Nach heutigen Standards gebaute Häuser sind deutlich besser isoliert.
- Die Heizung arbeitet mit Radiatoren. Fußboden- und Wandheizungen böten Vorteile, lassen sich aber nicht nachträglich einbauen.
- Die Häuser sind durch den Bestandsschutz geschützt. Deshalb kann leider keine zusätzliche Isolation von außen angebracht werden.
- Die Platzverhältnisse sind durch das Öllager und den Heizungskeller vorgegeben.
- Einige Grundstücke sind von außen schlecht zugänglich für schwere Maschinen.
- Die vorhandenen Stromanschlüsse sind nicht darauf ausgelegt, eine Heizung, die viel Strom verbraucht, zu versorgen.
- Die Warmwasserbereitung und die Heizung sind getrennt. Die bietet den Vorteil, dass der Brenner nicht immer in Betrieb sein muss, wodurch weniger Verluste entstehen.

3 Technische und Physikalische Grundlagen

Für das Verständnis der weiteren Kapitel sind gewisse theoretische Grundlagen erforderlich. Dieses Kapitel führt Begriffe ein, erklärt wichtige Konzepte und bereitet auf die späteren Fragestellungen vor.

3.1 Wärmebilanz eines Hauses

Warum muss man heizen?

Allgemein hängt die Temperatur in einem System von folgenden Prozessen ab - hier am Beispiel eines Hauses:

- Wärmeabfluss an die Umgebung, z.B. durch die Wände
- Wärmezufluss aus der Umgebung, z.B. durch die Heizung
- Umwandlung von anderen Energieformen in Wärme und umgekehrt, z.B. die Wärme von einem Herd

In einem Haus finden gemäss (Wesselak et al. 2013, Kapitel 2.2.3) folgende Prozesse statt:

- Wärmeabfluss durch Wände, Fenster und Dach
- Wärmeabfluss durch den Boden
- Wärmeabfluss beim Lüften
- Wärmezufluss durch die Heizung
- Wärmeeinstrahlung von der Sonne
- Wärmeproduktion im Haus durch Bewohner, Geräte und Cheminées

Damit die Temperatur im System konstant bleibt, müssen sich diese Prozesse ausgleichen. In einem Haus fliesst immer Wärme durch die Wände ab, solange ein Temperaturunterschied zwischen Innen- und Aussentemperatur besteht. Wie schnell Wärme durch eine Fläche abfliesst, wird durch Gleichung (1) beschrieben. Sie lässt sich auch auf ein Haus anwenden.

$$P = \Delta T \cdot A \cdot U \quad (1)$$

Die Variablen stehen hier für:

- P Wärmeabfluss durch die Fläche (in Watt)
 ΔT Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Aussentemperatur (in Kelvin)
 A Fläche (in m^2)
 U Wärmedurchgangskoeffizient - gibt die Dämmung an (in $W/m^2/K$)

Für ein Haus muss diese Rechnung für alle Außenflächen separat durchgeführt werden. Die Ergebnisse werden summiert (Wesselak et al. 2013, S. 61). Grund ist, dass Fenster andere Wärmedurchgangskoeffizienten haben als Wände und auf der Unterseite gegen den Boden eine andere Temperatur anlegt.

3.2 Aufbau einer Zentralheizung

Eine Zentralheizung heizt mehrere Räume von einem zentralen Wärmeerzeuger aus. Sie ist als Kreislauf aufgebaut: Wasser wird erhitzt, durch Rohre in Heizkörper geleitet, gibt dort die Wärme an den Raum ab und fliesst wieder zurück. Normalerweise wird eine Umwälzpumpe benötigt, um das Wasser in Bewegung zu halten (Paschotta 2022b). Der Heizkörper gibt die Wärme an den Raum grundsätzlich nach dem gleichen Prinzip ab, wie das Haus Wärme nach aussen verliert, also ähnlich Gleichung (1). Bloss möchte man hier möglichst viel Wärme austauschen, weshalb die Parameter genau in die andere Richtung optimiert werden: Je heißer das Wasser in den Heizkörpern, je grösser die Fläche der Heizkörper und je wärmedurchlässiger das Material, desto mehr Wärme kann übertragen werden.

3.3 Vorlauftemperatur und Heizkurve

Die Temperatur, auf die der Wärmeerzeuger in der Heizzentrale das Heizwasser erhitzt, wird als *Vorlauftemperatur* bezeichnet. Die Temperatur, mit der das Wasser zurückfliesst, heisst *Rücklauftemperatur* (Heße 2020, S. 1). Eine Heizung muss an kalten Tagen mehr Leistung abgeben als an warmen. Um sich daran anzupassen, kommen als Parameter theoretisch die drei Grössen aus Gleichung (1) in Frage, von denen jedoch nur die Temperatur in den Heizkörpern variiert werden kann. Diese kann der Heizkessel über die Vorlauftemperatur regeln.

Die Durchflussmenge durch die Heizkörper hat zwar auch einen Einfluss, lässt sich aber nicht zur Regelung der abgegebenen Heizleistung verwenden. Mit einem höheren Durchfluss kühlt sich das Wasser auf dem Weg durch die Heizkörper weniger stark ab. Dadurch steigt die durchschnittliche Temperatur der Heizkörper und damit die abgegebene Leistung. Weil sie sich aber nie über die Vorlauftemperatur heben lässt, führt eine Steigerung der Durchflussmenge über den vorgesehenen Wert zu keinem Leistungsgewinn. Eine tiefergehende Diskussion der Zusammenhänge findet sich bei (Heße 2020, Kapitel 5) und auf (www.haustechnikdialog.de 2004b).

Die Vorlauftemperatur berechnet die Heizung anhand der sogenannten *Heizkennlinie* oder *Heizkurve* aus der Aussentemperatur. Mit einigen Parametern muss sie an das Haus angepasst werden (Hermann 2020). Falls sie falsch eingestellt ist, erkennt man dies daran, dass es im Haus zu warm oder zu kalt ist. Laut (Heße 2020, Kapitel 5.2.1) „ist die Einstellung der Heizkurve eine wesentliche ‚Stellschraube‘ zur Beeinflussung der Energieeffizienz“. Die Parameter für die Heizkurve können laut Bernard Dubochet von der Energieberatung Winterthur und (Hermann 2020) nicht theoretisch, sondern nur durch Ausprobieren bestimmt werden. Die konkrete Berechnung der Heizkurve wird in (Heße 2020, Kapitel 5.2) theoretisch hergeleitet. Wie die Heizkennlinie der betrachteten Siedlung berechnet wird, ist in Kapitel 5.2 beschrieben. Die Heizkurve ist relevant für die vorliegende Arbeit, weil der Wirkungsgrad von Wärmepumpen stark von der Vorlauftemperatur abhängt.

3.4 Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe ist ein Gerät, das einem *kalten Reservoir* Wärme entzieht und dafür ein *warmes Reservoir* aufheizt (Cutnell et al. 2015, S. 361f.). Als Beispiel kann eine Luft-Wärmepumpe die Aussenluft abkühlen und dafür das Haus aufwärmen. Damit das funktioniert, benötigt sie Strom. Ziel der Energietechnik ist es, mit möglichst wenig Strom möglichst viel Wärme von aussen ins Haus zu bewegen. Wie effektiv das möglich ist, wird allerdings durch die Thermodynamik beschränkt. Zentral ist hier der Energieerhaltungssatz, der hier diese Form annimmt (Quaschning 2013, S. 343):

$$|Q_H| = |Q_K| + |W| \quad (2)$$

Q_H ist hier die (Wärme-)Energie, die auf der heissen Seite abgegeben wird,

Q_K ist die (Wärme-)Energie, die der kalten Seite entzogen wird und

W ist die (elektrische) Energie, die der Wärmepumpe zugeführt werden muss.

Für die heisse Seite wird genau so viel Energie gewonnen, wie der kalten entzogen und von aussen zugeführt wird. Weil die Vorzeichen der Grössen Verwirrung stiften können, ist es besser, nur mit den absoluten Werten zu rechnen. Um dies auszudrücken, werden die Grössen zwischen $||$ gesetzt.

Die zweite Limitierung entspringt dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Jener bewirkt u.a., dass Wärme nur von warm nach kalt fliesst. Bei der Wärmepumpe fliesst sie nur deshalb auch in die umgekehrte Richtung, weil von aussen Strom zugeführt wird. Um wieviel das warme Reservoir (etwa ein Haus) pro eingesetztem Strom geheizt werden kann, wird durch den sogenannten Carnot-Wirkungsgrad begrenzt, der mit folgendem Term bestimmt wird:

$$\frac{|Q_H|}{|W|} = \frac{T_H}{T_H - T_K} \quad (3)$$

Die Temperaturen T_H und T_K müssen in Kelvin angegeben werden. Für Wärmepumpen ist diese Grösse unter anderem als *Wirkungsgrad*, *Leistungszahl* und *COP(Coefficient of Performance)* bekannt. Ihr kommt eine grosse Bedeutung zu, weil sie den Unterschied zwischen einer Wärmepumpenheizung und allen anderen Heizkonzepten ausmacht: Eine Heizung, die mit Öl, Gas oder Holz arbeitet, muss die gesamte Energie für das Haus aus dem Energieträger beziehen. Einer Wärmepumpenheizung muss hingegen nur ein Teil davon in Form von Elektrizität zugeführt werden - den Rest entzieht sie dem kalten Reservoir. Zu beachten ist hier die Differenz im Nenner: Je grösser der Temperaturunterschied zwischen warmem und kaltem Reservoir ist, desto ineffektiver arbeitet die Wärmepumpe. Die Temperatur des warmen Reservoirs entspricht der Vorlauftemperatur der Heizung. Ist diese besonders hoch, wie das an kalten Tagen oder bei kleinen Radiatorenflächen der Fall ist, so ist auch die Temperaturdifferenz grösser und der Wirkungsgrad sinkt.

Die Funktionsweise einer Wärmepumpe sei hier nach (Wesselak et al. 2013, S.18ff.) und (Bonin 2017, S. 18) kurz erklärt: Im Inneren der Wärmepumpe zirkuliert ein *Kältemittel* in einem Kreislauf. Zunächst fliesst es in flüssigem Zustand am kalten Reservoir entlang. Dabei verdunstet es nach und nach, wozu es der Umgebung Wärme entzieht und demzufolge das kalte Reservoir abköhlt. Ein *Kompressor* saugt das Gas an und komprimiert es,

wodurch es sich erhitzt. Hinter dem Kompressor befindet sich das warme Reservoir. Der Druck beeinflusst das Verhalten des Gases: Während der Unterdruck auf der Saugseite noch die Verdunstung begünstigt hat, wird es nun derart verdichtet, dass ein Teil kondensieren muss, um den Druck abzubauen. Die Energie, die beim Verdunsten aufgenommen wurde, wird hier wieder abgegeben, und zwar an das warme Reservoir. Nachdem es flüssig geworden ist, fliesst das Kältemittel durch ein *Drosselventil* zurück in den kalten Teil. Das Drosselventil lässt nur so viel Flüssigkeit durch, dass der Druck im warmen Teil nicht in den kalten entweichen kann. Dieser Kreislauf läuft kontinuierlich ab.

Die Wärmepumpe benötigt Strom, um den Motor des Kompressors zu betreiben. Das Verhältnis zwischen der Energie, die eine Wärmepumpenheizung im Verlauf eines Jahres abgegeben hat, und dem dazu verbrauchten Strom wird als *Jahresarbeitszahl (JAZ)* bezeichnet. Sie ähnelt damit dem Wirkungsgrad, berücksichtigt aber neben der Wärmepumpe selbst auch Effizienzverluste, die im Heizkreislauf oder durch ungünstige Steuerung auftreten (Watter 2022, S. 146). Die JAZ wird verwendet, um Wärmepumpenheizungen untereinander zu vergleichen.

4 Vorstellung der Heizkonzepte

Die folgenden Kapitel drehen sich um die drei Heizkonzepte Luft-Wärmepumpe, Erdsonde-Wärmepumpe und Pelletheizung. Sie werden vertieft, weil sie für die betrachtete Siedlung als realistische Lösungen in Frage kommen. Andere Heizlösungen, die ebenfalls betrachtet wurden, aber für die Bachegglweg-Reihenhäuser nicht in Frage kommen, werden im Anhang ab Seite 49 behandelt.

4.1 Luft-Wärmepumpe

Woher kommt die Energie? Eine Luftwärmepumpenheizung bezieht die Energie zum Heizen direkt aus der Aussenluft: Sie kühlst die Aussenluft ab und heizt dafür den Innenraum. Technisch ähnelt es einem umgekehrten Kühlschrank: Ein Kühlschrank kühlst innen und heizt aussen, die Wärmepumpe heizt innen und kühlst aussen. Es bietet sich an, die Wärme direkt der Luft zu entziehen, da Luft überall unbegrenzt und kostenlos verfügbar ist. Zum Tragen kommen hier aber die Beschränkungen durch die Thermodynamik, die in Kapitel 3.4 bereits ausgeleuchtet worden sind. Ungünstigerweise arbeitet eine Luft-Wärmepumpe ausgerechnet dann am schlechtesten, wenn es am kältesten ist - also genau dann, wenn am Intensivsten geheizt wird.

Wie wird es technisch umgesetzt? Das wichtigste Bauteil ist eine Wärmepumpe mit integriertem Ventilator zum Ansaugen der Luft. Ferner werden ein Pufferspeicher und der Anschluss an die Heizungsrohre benötigt. Wo was aufgestellt wird, lässt sich jedoch variieren (Quellen: Sobotta 2018, S. 145 und Bonin 2017, S. 30):

- Innenaufstellung: Alles steht nebeneinander im Keller. Mit zwei Luftsäcken wird die Luft angesaugt und abgelassen.
- Aussenaufstellung: Die Wärmepumpe steht draussen; zwei Rohre transportieren die Wärme zum Pufferspeicher drinnen, der sie an den Heizkreislauf übergibt.
- Splitaufstellung: Eine Wärmepumpe hat immer eine Seite, die kühlst (Verdampfer) und eine, die wärmt (Kondensator). Hier sind die beiden getrennt: Die kühlende Seite steht zusammen mit dem Ventilator draussen, die wärmende innen im Heizkeller.

Je nachdem, welche Komponenten draussen stehen, besteht die Gefahr einer Vereisung. Dagegen müssen spezielle Massnahmen ergriffen werden wie der Einsatz von Frostschutzmitteln und Heizaggregaten zum Abtauen.

Wie leicht kann man es in der vorliegenden Siedlung installieren? Denkbar sind folgende Szenarien:

- Individuell: Jedes Haus für sich
- Blockweise: Je die 4/2/4 aneinanderhängenden Häuser zusammen
- Zentral: Verwendung des jetzigen Heizungskellers

Wahrscheinlich werden auch zusätzliche Stromleitungen benötigt, da die derzeitigen Anschlüsse (2x 50 kW) nicht darauf ausgelegt sind, eine solche Heizung bei tiefen Temperaturen zu betreiben.

Vorteile/Nachteile Luftwärmepumpen erfreuen sich nicht nur wegen der Nachhaltigkeit, sondern auch dank ihrer niedrigen Kosten wachsender Beliebtheit - dies zeigen Verkaufszahlen der (Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz 2022).² Mit den erhöhten Energiekosten 2022 hat sich der Unterschied zu anderen Heizkonzepten nur noch verstärkt, da die Strompreise im Vergleich mit anderen Energieträgern weniger stark gestiegen sind. Auch der Wartungsaufwand ist gering. Gegenüber einer Erdsondenheizung sind die Investitionskosten deutlich niedriger, zudem ist kein kompliziertes Genehmigungsverfahren erforderlich.

Wichtig zu beachten ist jedoch der Lärm, den Luftwärmepumpen (in Aussen- und Splittaufstellung) verursachen. Die Hersteller sind zwar bemüht, die Lärmemissionen tief zu halten, trotzdem stellen sie ein Problem dar. Im Buch „Praxis Wärmepumpe“ von Stefan Sobotta (Sobotta 2018, S. 145ff.) umfasst das Kapitel zu Luftwärmepumpen eine 10-seitige Einführung in Physik, Gesetzgebung und Normierung von Lärm.

Bei tiefen Temperaturen arbeiten Luftwärmepumpen sehr ineffizient. Das ist einerseits technisch nicht schön, sollte der Strompreis in den nächsten Jahren im Winter aber deutlich höher als im Sommer sein, wird das auch einen massiven Einfluss auf die Kosten haben. Gemäss der Berechnung aus Kapitel 6 entfiele die Hälfte des Stromverbrauchs einer Luftwärmepumpenheizung für die betrachteten Häuser auf Tage, an denen die Temperatur unter 2 °C liegt. Wenn der Strom gerade dann teurer ist, werden die Kosten viel höher als geplant ausfallen.

4.2 Erdsonde-Wärmepumpe

Woher kommt die Energie? Misst man unter der Erde die Temperatur in unterschiedlichen Tiefen, so stellt man fest, dass sie an der Oberfläche mit den Jahreszeiten schwankt, ab einer gewissen Tiefe aber durchgehend konstant ist. Kühlt man das Erdreich an einer Stelle ab, fliesst aus der Umgebung Wärme nach. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, die Erde als Energiequelle zu nutzen. Man spricht dabei von Geothermie oder Erdwärme.

Wie wird es technisch umgesetzt? Zuerst wird ein 100-400 Meter tiefes Loch gebohrt.³ Darin werden zwei U-förmige Rohre eingelassen.⁴ Durch diese Rohre wird Wasser im Kreis gepumpt. Das aufsteigende Wasser wird von einer Wärmepumpe um 3 K abgekühlt (Bußmann 2011, S. 145) und zurück nach unten gepumpt, wo es sich wieder erwärmt.

Wie Abbildung 5 zeigt, gibt es insgesamt folglich drei Flüssigkeitskreisläufe mit jeweils einer eigenen Pumpe (ZHAW - Institut für Facility Management 2010):

²Anstieg von 14000 im Jahr 2018 kontinuierlich auf 24600 im Jahr 2021

³In der vorliegenden Siedlung sind maximal 317m gestattet

⁴Eines reicht; in der Praxis verwendet man gerne zwei, weil man bei gleicher Tiefe die doppelte Rohroberfläche erreicht (Bonin 2017, S. 100).

- Sondenkreislauf: Hier wird Sole (Wasser + Salz als Frostschutzmittel) durch die Rohre der Erdsonde nach unten und wieder hoch gepumpt. Sie nimmt Wärme aus dem Boden auf und gibt sie an den Kältemittelkreis weiter.
- Kältemittelkreis: Dieser befindet sich komplett innerhalb der Wärmepumpe. Das Kältemittel tritt mal flüssig, mal gasförmig auf und wird von einem Kompressor in Bewegung gehalten. Die Funktionsweise von Wärmepumpen wurde in Kapitel 3.4 erklärt. Die Wärmepumpe überträgt Wärme aus dem Sondenkreislauf auf den Heizkreislauf.
- Heizkreislauf: In diesem Kreislauf fliesst Heizwasser vom Heizkeller, wo es von der Wärmepumpe erwärmt wurde, durch die Heizkörper im Haus und wieder zurück. Es verteilt die Wärme auf das ganze Haus.

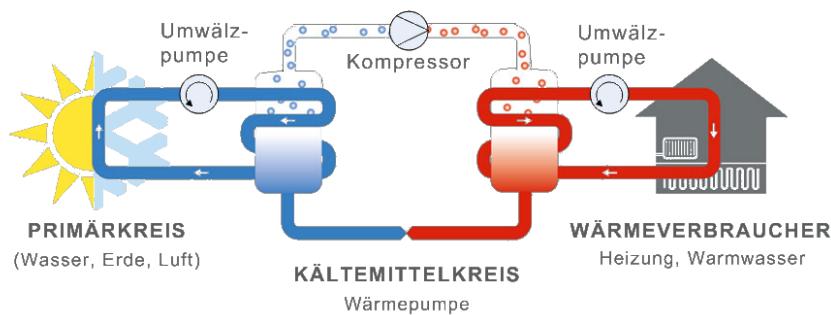


Abbildung 5: Die drei Kreisläufe einer Wärmepumpenheizung mit Erdsonde
Quelle: (ZHAW - Institut für Facility Management 2010)

Wärmenutzung aus Grundwasser Neben Erdsonden besteht auch die Möglichkeit, Wärme direkt aus dem Grundwasser zu beziehen. Das Prinzip beruht darauf, warmes Grundwasser mit einer Pumpe anzusaugen (Förderbrunnen), unter Wärmegewinnung um 3-4 K abzukühlen und das kalte Wasser zum Ausgleich in der Nähe wieder in den Boden zu leiten (Schluckbrunnen) (Wesselak et al. 2013, S. 153). Im Vergleich mit Erdsonden ist die Temperatur des hochgepumpten Wassers und damit der Wirkungsgrad der Wärmepumpe deutlich höher, zudem muss oft weniger tief gebohrt werden, wodurch die Installation deutlich günstiger wird. Im Kanton Zürich sind gemäss (Ryser, Dr. Heinrich Jäckli AG, and AWEL, Abteilung Gewässerschutz n.d.) jedoch (in der Grundwasserzone der vorliegenden Siedlung) nur Anlagen ab 50 kW erlaubt (Kanton Zürich 2022b). Der Grund dafür ist, dass mit jedem zusätzlichen Brunnen das Risiko von Grundwasserverunreinigungen steigt, deshalb möchte der Kanton nur wenige, grosse Anlagen haben. Die zehn Häuser benötigen jedoch höchstens knapp 50 kW. Bernard Dubochet (Dubochet 2022) erklärte im Gespräch, dass man laut Geologen unter Winterthur-Seen zu wenig Grundwasser finden würde, um eine Heizung damit betreiben zu können, teure Probebohrungen nötig wären und dass sich Erdsonden und Grundwasserpumpen im gleichen Gebiet normalerweise ausschliessen. Aus diesen Gründen kommt diese Lösung für die betrachtete Siedlung nicht in Frage.

Wie leicht kann man es in der vorliegenden Siedlung installieren? Die Nutzung von Erdwärme ist nicht überall gestattet. Der Kanton Zürich gibt auf (Kanton Zürich

2022a) eine Übersicht über die nötigen Schritte für eine Bewilligung und gibt als Grund u.a. an, dass Erdsonden das Trinkwasser gefährden können. Im Geoinformationsbrowser des Kantons (Kanton Zürich 2022b) kann man nachschlagen, wo es möglich ist. Der Screenshot (Abbildung 6) zeigt, dass es am Standort der Siedlung gestattet ist und welche Nachbarhäuser bereits nach Erdwärme gebohrt haben. Es wird sogar angezeigt, wie tief deren Sonden sind und wie viel Energie sie theoretisch beziehen. Sehr schwierig wird es im Fall der vorliegenden Siedlung hingegen, Standorte für die Bohrungen zu finden. Von aussen sind viele der Grundstücke für die schweren Maschinen schlecht zugänglich. Diese Häuser wären also darauf angewiesen, dass es eine gemeinschaftliche Lösung gibt und sie die Wärme anderer Grundstücke nutzen können. Eine detailliertere Untersuchung müsste jedoch mit einem Anbieter von Erdsondebohrungen erfolgen.

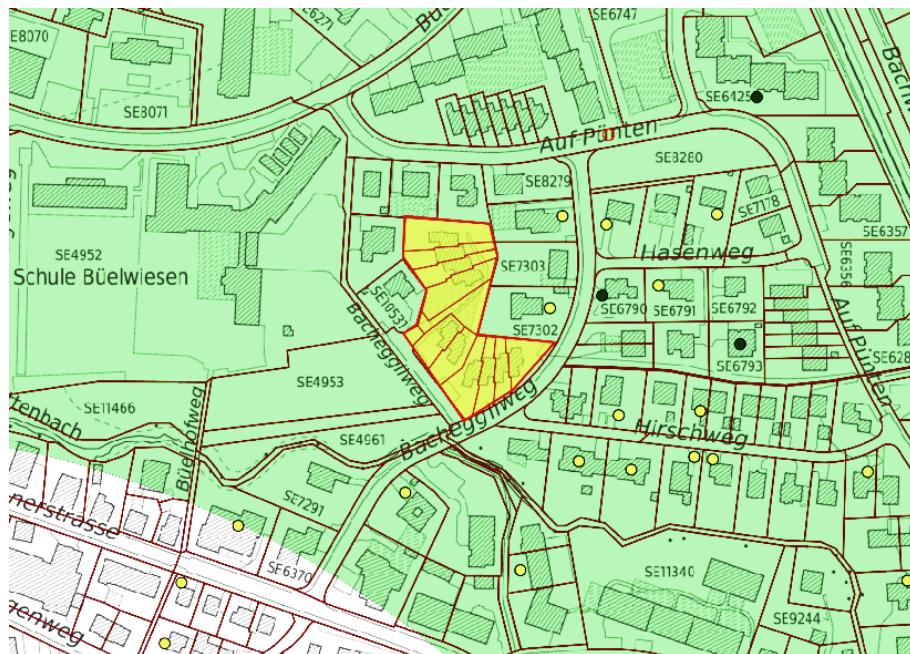


Abbildung 6: Karte aus dem Geoinformationsbrowser des Kantons Zürich. Kreise stehen für Erdsondebohrungen. Die grüne Farbe markiert die Zulässigkeitszone D (in der Bohrungen erlaubt sind); die Siedlung ist gelb markiert. Quelle: (Kanton Zürich 2022b)

Vorteile/Nachteile Von allen Heizkonzepten sind Erdsonden mit Abstand am teuersten zu installieren. Das liegt vor allem am Aufwand für die Bohrungen. Einmal gebaut hat eine Erdsondenheizung aber auch die tiefsten Energie- und Wartungskosten, wodurch sie langfristig wiederum die günstigste Lösung ist. Für Neubauten sind sie das Mittel der Wahl, in diesem Fall ist die Lage jedoch schwieriger. Das liegt einerseits am schweren Zugang für die Baumaschinen, zudem arbeitet die Wärmepumpe wegen der hohen Vorlauftemperatur der Heizung (siehe Kapitel 3.3) ineffizienter.

Gegenüber der Luft-Wärmepumpe hat Erdwärme den grossen Vorteil, dass der Boden das ganze Jahr lang gleich viel Wärme liefern kann. Das schlägt sich direkt in tieferen Stromkosten für Erdwärme nieder. Weitere Vorteile sind geringere Lärmemissionen und ein kleinerer Platzbedarf (Sobotta 2018, S. 113).

Gegenüber fossilen Heizungen ist der grosse Unterschied, dass Erdwärme erneuerbar ist. Zudem ist man unabhängig vom Öl- und Gaspreis.

4.3 Holzpelletheizung



Abbildung 7: Holzpellets Quelle: Wikimedia Commons - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Holzpellets.jpg>

Woher kommt die Energie? In der Holzverarbeitung fallen grosse Mengen Sägespäne und -Mehl als Abfallprodukt an. Diese lassen sich als Energieträger zum Heizen nutzen. Holzpellets werden hergestellt, indem diese Sägespäne unter Wärme zu Stäbchen gepresst werden. Weil sie durch den im Holz vorhandenen Klebstoff Lignin zusammengehalten werden, sind keine Zusatzstoffe nötig (Watter 2022, S. 212). Bei der Verbrennung von Holz entsteht CO₂, und zwar genau so viel, wie die Bäume beim Wachsen der Atmosphäre entzogen haben. Somit sind Holzpellets klimaneutral, sofern man die Emissionen bei Transport und Verarbeitung ignoriert.

Wie wird es technisch umgesetzt? Eine Holzpelletanlage besteht aus ähnlichen Komponenten wie ein Ölbrenner. Die Pellets werden in einem Vorratstank aufbewahrt. Zum Brennraum werden die Pellets mit einer Förderschnecke oder mittels Druckluft transportiert (www.energie-experten.org 2022). Der Brennprozess im Brennraum wird so geregelt, dass die Pellets möglichst vollständig verbrennen, d.h., dass möglichst wenig Asche und Gase entstehen. Mit der Wärme wird anders als bei einem Ofen nicht der Raum geheizt, in dem die Anlage steht, sondern das Heizwasser aus dem Heizkreislauf wieder erwärmt.

Warum Pellets und kein Stückholz? Weil Holzpellets verglichen mit einem Holzscheit so klein sind, lassen sie sich sehr gut dosieren und maschinell nachfüllen. Darum kann eine Holzpelletanlage vollautomatisch und wartungsfrei arbeiten, ohne dass jemand Holz nachlegen müsste. Zudem läuft der Brennprozess beim Verbrennen von Scheitholz unsauberer ab. Einerseits werden mit Nachlegen eines neuen Scheits die Bedingungen durcheinandergebracht (neuer Scheit noch kalt, in anderem Brennstadium, feucht). Weil der Füllstand der Brennkammer variiert, passen Belüftung und Verbrennung oft nicht zueinander (Wesselak et al. 2013, S. 418). Deshalb entsteht in einem Kamin viel mehr

Feinstaub und Asche als bei einer automatisch gesteuerten Holzpelletanlage, die kontinuierlich arbeitet.

Wie leicht kann man es in der vorliegenden Siedlung installieren? Der grosse Vorteil bei einer Holzpelletanlage wäre, dass man auf die bestehende Infrastruktur der Ölheizung zurückgreifen kann. Den Kamin, den Lagerraum für den Brennstoff und den Raum für den Kessel könnte man direkt weiterverwenden. Der bestehende Heizkreislauf könnte mit gleichen Parametern weiter betrieben werden.

Vorteile/Nachteile Finanziell ist eine Holzpelletanlage teurer in der Anschaffung als eine Öl- oder Gasheizung, aber günstiger als eine Wärmepumpenanlage. Die laufenden Wartungs- und Energiekosten liegen zwischen denen einer fossilen- und einer Wärmepumpenheizung. Deshalb haben Holzpelletheizungen bis vor kurzem finanziell nicht besser abgeschnitten als fossile Lösungen (so z.B. in der Broschüre des Kanton ZH zur Abstimmung über das Energiegesetz (Kanton Zürich 2021)).

An einer Informationsveranstaltung zum Thema Heizsysteme diesen Juni 2022 (Stadtwerk Winterthur 2022a) hieß es, dass Holzheizungen allgemein neuerdings einen extremen Boom erleben. Das werde auch langfristig zu höheren Preisen führen. Verkäufer von Holzheizungen warben damit, dass man auch langfristig genug Holz aus der Region zum Heizen beziehen können würde. In Deutschland hingegen wird davor gewarnt, dass die ohnehin schon angeschlagenen Wälder der steigenden Nachfrage nach Holzpellets nicht gewachsen sind.⁵ Im Zuge der Energiekrise 2022 ist die Nachfrage nach Brennstoff aus Angst vor Energieknappheit im Winter gestiegen. Das Portal heizpellets24.ch verglich die Situation gar mit den Hamsterkäufen von WC-Papier in den ersten Wochen der Coronapandemie (Klapschus 2022).

4.4 Photovoltaik für Wärmepumpen

Der Einbau einer Wärmepumpe erhöht den Stromverbrauch eines Haushalts massiv. Es erscheint deshalb attraktiv, einen Teil des Stroms mittels Photovoltaik (PV) selber zu erzeugen. Im Januar 2022 hat unsere Familie eine Offerte für Solarzellen auf dem Dach eingeholt. Diese prognostiziert einen jährlichen Stromertrag von 6374 kWh. Die Solarpotenzialkarte des Kanton Zürich (Kanton Zürich 2022b) hatte 13'400 kWh überschlagen. Die Differenz kommt u.a. dadurch zustande, dass die vielen nicht-rechten Winkel, der Kamin und Dachfenster keine elegante Platzierung der Module ermöglichen. So kann nur ein kleiner Teil der Fläche genutzt werden. Der jährliche Strombedarf für eine Erdsonde-Wärmepumpe für alle zehn Häuser beträgt laut der Berchnung, die in Kapitel 6.4 durchgeführt werden wird, ca. 50'000 kWh. Leider liefern PV-Anlagen vor allem im Sommer gute Leistungen, während der Stromertrag der Wintermonate überschaubar ist. So listet die Offerte für die Monate November - Januar insgesamt knapp 1000 kWh, während zum Heizen mit einer Erdsonde pro Haus in dem Zeitraum 4200 kWh benötigt würden. Gerade dann, wenn der Strom für die Wärmepumpe gebraucht wird, liefert die PV-Anlage wenig Leistung. Photovoltaik könnte zwar einen Beitrag leisten, würde aber nicht primär dafür installiert. Zum

⁵Ergab eine Google-Suche nach „holzpellet nachfrage wälder“: <https://www.google.com/search?q=holzpellet%20nachfrage%20w%C3%A4lder>

Zeitpunkt der Offerte hätte sich eine PV-Anlage laut dem Installateur nicht refinanziert. Seit dem Kriegsausbruch ist die Situation umgeschlagen; die Nachfrage nach PV-Modulen ist sprungartig gestiegen und die Installateure sind vollständig ausgelastet. Vorerst wird es darum schwierig sein, Photovoltaik zu installieren.

4.5 Bivalente Systeme

In der Praxis können Wärmepumpen bei hohen Temperaturdifferenzen die Nennleistung nicht erbringen.⁶ Das fällt an sehr kalten Tagen ins Gewicht und stellt bei Luftwärmepumpen ein Problem dar. Bei tiefen Temperaturen ist der Energiebedarf ohnehin schon hoch, und die Wärmepumpe kann weniger Energie liefern als normalerweise (Bonin 2017, S. 161). Für diese Situation bieten sich drei Lösungen an:

1. In Kauf nehmen, dass es im Haus an sehr wenigen Tagen kühler ist.
2. Eine Wärmepumpe installieren, die genug Leistung hat, um auch an diesen Tagen den ganzen Heizenergiebedarf decken zu können. Dafür ist sie dann den Rest des Jahres stark überdimensioniert und arbeitet ineffizient.
3. Ein *bivalentes System*. Dabei wird ein zweiter Wärmeerzeuger installiert, der an kalten Tagen einspringt.

Eine einfache Möglichkeit für einen zweiten Wärmeerzeuger ist ein Heizstab. Dieser besteht aus einem grossen elektrischen Widerstand, der mit Strom das Wasser direkt heizt. Ab einer gewissen Anlagengrösse lohnt sich auch ein vollwertiger Heizkessel mit einer Holzfeuerung. Während ein solches System aus energetischer Sicht nur Vorteile bietet, erfordert der Einbau den Platz, die Investitions- und Wartungskosten und den Verwaltungsaufwand von zwei Heizungssystemen.

⁶Dies wurde aus den Datenblättern zweier Wärmepumpen ersichtlich.

5 Modellierung der Parameter

Als Kernstück der Arbeit soll für jedes der drei Heizkonzepte aus dem vorherigen Kapitel abgeschätzt werden, wie viel Strom bzw. Pellets für die vorliegende Reihenhausüberbauung jährlich benötigt würden. Um die Berechnung möglichst gut mit realistischen Zahlen abzustützen, müssen einige Daten vorbereitet werden. Hier wird erklärt, wie die Parameter bestimmt wurden. Das anschliessende Kapitel zur Berechnung wird keine weiteren Recherchen mehr beinhalten, sondern nur noch Formeln und Werte aus den vorangegangenen Kapiteln kombinieren.

5.1 Jährlicher Energiebedarf der Siedlung

Eine neue Heizung wird jährlich wieder gleich viel Energie bereitstellen müssen wie die bisherige - unabhängig davon, was für Heizkonzept eingebaut wird. Auf den ersten Blick entspricht diese Energiemenge dem Ölverbrauch. Leider treten beim Verteilen der Wärme an die einzelnen Häuser und bereits im Heizungskeller selbst Effizienzverluste auf. So geht ein gewisser Teil der Energie verloren, indem der Heizungskeller geheizt wird, wenn der Kessel beim Hochfahren der Heizung aufgeheizt werden muss und um ihn auf der Temperatur zu halten.⁷ Für das Modell wird angenommen, dass alle diese Verluste auch bei einer neuen Heizung gleich gross ausfallen werden und werden darum vernachlässigt. Berücksichtigt werden muss jedoch, dass der Ölbrenner nicht die gesamte Energie aus dem Heizöl nutzen kann:

Ein Teil geht verloren, weil beim Verbrennen gasförmiger Dampf entsteht. Würde man das Abgas kondensieren lassen, liesse sich diese Energie zurückgewinnen. Um das zu berücksichtigen, werden für die Energie, die in Heizöl und anderen Brennstoffen enthalten ist, zwei Werte angegeben: Den *Heizwert* und den *Brennwert*. Der *Heizwert* gibt an, wie viel Wärmeenergie direkt freigesetzt wird, wenn ein Liter Öl verbrannt wird, ohne die Kondensationswärme aus dem Abgas zu berücksichtigen. Der *Brennwert* hingegen enthält auch diese Energie. Sogenannte *Brennwertkessel* können das Abgas kondensieren lassen und somit den ganzen Brennwert ausschöpfen (Paschotta 2020b). Für Heizöl liegt der Heizwert bei 10.0 kWh/l und der Brennwert bei 10.7 kWh/l (Wikipedia 2022b). Zusätzlich geht Wärme durch die warme Abluft aus dem Kamin verloren (Paschotta 2020a). Bei der Installation des Brenners in der betrachteten Siedlung wurden mehrere Messungen durchgeführt, die durchschnittlich einen Verlust von 4% gegenüber dem Heizwert ergaben.⁸ Diese Abgasverluste würden beim Einbau eines anderen Heizungstyps nicht anfallen und müssen deshalb berücksichtigt werden. Es ergibt sich als jährlicher Energiebedarf:

$$E_a = V \cdot w \cdot \eta \quad (4)$$

⁷Dies fällt besonders ins Gewicht, wenn der Brenner der Heizung gleichzeitig auch zur Warmwasserbereitung genutzt werden muss und deshalb auch im Sommer in Betrieb ist. Dies war in der betrachteten Siedlung bis 2005 der Fall. Mit der Umstellung auf eine individuelle Warmwasserbereitung je Haus konnte der Ölverbrauch um ein Drittel gesenkt werden.

⁸Dazu wurden die Temperatur und der Sauerstoffgehalt des Abgases gemessen und mithilfe der sogenannten Siegertschen Formel der Abgasverlust berechnet (Paschotta 2020a)

E_a Jährlicher Energiebedarf der Heizung in kWh

V Jährlicher Ölverbrauch in l

w Energiedichte von Heizöl in kWh/l

η Wirkungsgrad der Heizung

Hier können die Zahlenwerte eingetragen werden:

$$E_a = 21'000 \text{ l/Jahr} \cdot 10.0 \text{ kWh/l} \cdot 0.96 = 201'600 \text{ kWh/Jahr}$$

Für das kälteste (2013) und mildeste (2014) Jahr ergeben sich aus den Ölverbräuchen 230'000 kWh und 175'700 kWh.

5.2 Vorlauftemperatur der Heizung

Die Vorlauftemperatur der Heizung wird mittels der in Kapitel 3.3 beschriebenen Heizkurve aus der Aussentemperatur berechnet. Je nach Hersteller erfolgt die Berechnung unterschiedlich und es sind unterschiedliche Parameter verfügbar. Für die Berechnung im nächsten Kapitel wird die Heizkurve der bestehenden Heizung verwendet. Der derzeit installierte Kessel bietet nur einen Parameter für den Anwender an: Die *Steilheit*. Im Handbuch sind Graphen für ausgewählte Werte abgebildet, siehe Grafik 8.

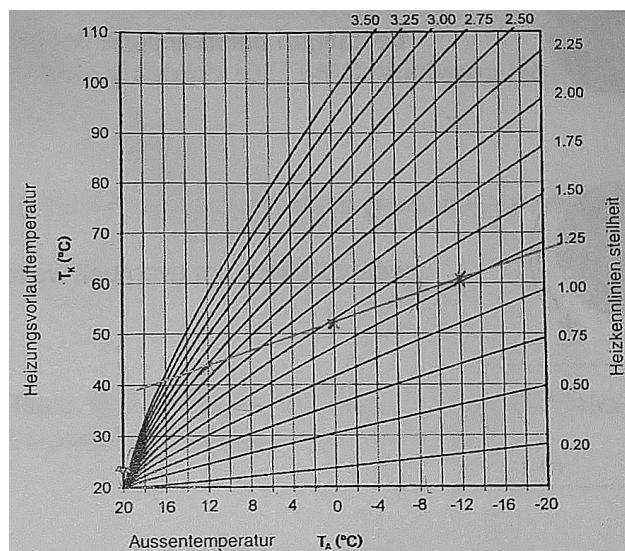


Abbildung 8: Heizkurven für die Heizung der betrachteten Siedlung für unterschiedliche Steilheiten Quelle: Handbuch des Kessels

In (www.haustechnikdialog.de 2004a, Post #51555 von Martin Glane) fanden sich Anhaltspunkte, wie sich diese Kurven mit einer Formel beschreiben lässt. Mit Hilfe von GeoGebra und Excel gelang es, sie mit Gleichung (5) sehr gut anzunähern. Die Steilheit beträgt derzeit 1.65.

$$\vartheta_V(\vartheta_A) = 20 \text{ } ^\circ\text{C} + \text{Steilheit} \cdot 2.125 \cdot (20 \text{ } ^\circ\text{C} - \vartheta_A)^{0.78} \quad (5)$$

ϑ_V Vorlauftemperatur der Heizung in °C

ϑ_A Aussentemperatur in °C

Als Beispiel liegt die Vorlauftemperatur bei einer Aussentemperatur von 4 °C bei 51 °C und an einem -5 °C kalten Tag bei 63 °C.

5.3 Reservoirtemperatur von Erdsonden

Zentral für die Berechnung der Effizienz der Wärmepumpe bei einer Erdsonde ist die Temperatur der hochgepumpten Sole (Wasser + Frostschutzmittel). Das Erdreich hat das ganze Jahr über eine Temperatur zwischen 8 °C und 12 °C (Bußmann 2011, S. 143) Nutzt man Wärme aus Grundwasser, so hat dieses ebenfalls Temperaturen in diesem Bereich. Eine Erdsonde liefert hingegen deutlich kälteres Wasser. Entzieht man der Erde Wärme, so nimmt die Temperatur zunächst ab, pendelt sich aber bald auf einem neuen Gleichgewicht ein, das langfristig stabil bleibt (Dubochet 2022). Die Temperatur soll aus gesetzlichen Gründen nicht unter -1 °C absinken. Im Verlauf jedes Winters kühlte die Erde etwas ab und regeneriert sich wieder im Sommer; dieser Effekt wird hier jedoch vernachlässigt. Sole-Wärmepumpen werden nach der Norm DIN EN 14511-2 bei 0 °C geprüft (Bonin 2017, S. 52). Während in der Literatur jeweils mit Werten zwischen -1 °C und 5 °C gerechnet wurde, ergaben sich für das Quartier, in dem die vorliegenden Häuser stehen, viel höhere Temperaturen. So sprach ein Nachbar, der seit drei Jahren Erdwärme nutzt, sogar von einer Reservoirtemperatur von 14 °C. Bei einem anderen Haus lagen die Temperaturen bei 12 °C im Herbst, 10 °C Ende November und 8 °C im Februar. Für die Berechnung im nächsten Kapitel werden aus Vorsicht 8 °C als erwarteter Wert verwendet. Weil die Temperatur in den ersten Jahren noch absinken kann und jeweils in der zweiten Hälfte des Winters tiefer liegt, wurde der Wert eher konservativ gewählt. Für den ungünstigsten Wert werden 3 °C angenommen, für den besten Wert 11 °C.

5.4 Verhalten der Wärmepumpen

Grundlegendes zu Wärmepumpen und ihre Abhängigkeit vom Carnot-Wirkungsgrad wurden bereits in Kapitel 3.4 behandelt. Der COP von Wärmepumpen wird hier modelliert, indem jeweils mit einem konstanten Bruchteil des maximal möglichen Carnot-Wirkungsgrads gerechnet wird. Dieser Ansatz wird in (Hadorn 2015, S. 34) vorgeschlagen, es wird jedoch davor gewarnt, damit über den gewöhnlichen Bereich hinaus zu extrapolieren. Der Anteil vom Carnot-Wirkungsgrad, den eine Wärmepumpe erreicht, wird als *Güte* bezeichnet (Quaschning 2013, S. 344).

Gemäß Norm EN 14511-2 geben Hersteller von Wärmepumpen Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Bedingungen an. Diese Bedingungen werden in einer Kurzschreibweise abgekürzt: „B0/W35“ bedeutet beispielsweise, dass eine Wärmepumpe auf der kalten Seite mit 0 °C warmer Sole von einer Erdsonde arbeitet und damit das Wasser für die Heizung auf 35 °C erwärmt. *B* steht hier für *brine*, das englische Wort für Sole; *W* für *water* oder Wasser. Die anderen Abkürzungen sind:

- W Grundwasser oder Heizwasser
- B oder S Sole (für eine Erdsonde-Wärmepumpe)
- A oder L Luft (*air*)

Für Erdsonde-Wärmepumpen werden üblicherweise B0/W35 und B0/W55 angegeben. Gemäss (Bonin 2017) ist B0/W35 für die Heizung, B0/W55 für die Warmwasserbereitung vorgesehen. Basierend auf Daten von der Seite (www.topten.ch 2022) und Datenblättern der Hersteller wurde eine Tabelle mit diesen Werten für elf reale Sole-Wärmepumpen unterschiedlicher Hersteller erstellt. Die COP-Werte für B0/W35 und B0/W55 wurden jeweils mit dem Wirkungsgrad verglichen, der gemäss Carnot maximal möglich wäre. Die COPs entsprachen im Schnitt 52% davon, bei einer Spanne von 47% bis 54%. Die Angaben zu Luft-Wärmepumpen auf der Website waren leider weniger zuverlässig, weil einige Werte zu hoch wirkten oder auf den Websites der Hersteller nicht gefunden werden konnten. Stattdessen wurden Datenblätter diverser Hersteller gesucht und die Daten erneut in Excel ausgewertet. Die Suche gestaltete sich etwas schwierig, weil für die meisten Modelle nur die COPs für A7/W35, A2/W35 und A-7/W35 angegeben werden, also für eine Vorlauftemperatur von 35 °C. Für die vorliegende Siedlung sind jedoch höhere Vorlauftemperaturen nötig und es muss in Erfahrung gebracht werden, ob sich die Werte dorthin extrapolieren lassen. Für diejenigen Wärmepumpen, bei denen weitere Werte angegeben waren, war dies gut möglich. Als Mittelwert für den Gütegrad wurden 42% bestimmt. Die schlechtesten Gütegrade lagen bei 38%, die beste Wärmepumpe war ein Ausreisser mit 50%, die nächste erreichte 46%. Als bestmöglicher Wert wurde deshalb 47% gewählt. Es lässt sich festhalten, dass Luft-Wasser-Wärmepumpen generell bei gleichen Temperaturen ineffizienter als Sole-Wasser-Wärmepumpen arbeiten. Die Tabellen finden sich im Anhang.

Eine Wärmepumpe muss von der Dimensionierung zum Wärmeverbrauch passen. Laut Dubochet (Dubochet 2022) läuft es bei grösseren Anlagen darauf hinaus, mehrere Wärmepumpen mit einer Leistung von jeweils 10 kW - 25 kW zu installieren. Angegeben wird jeweils die Leistung, die die Wärmepumpe bei B0/W35 (Erdsonde) oder A2/W35 (Luft) maximal an die Heizung abgeben kann. Bei ungünstigeren Temperaturen kann dieser Wert aber nicht erreicht werden! Dieser Fall tritt ein, wenn die Vorlauftemperatur der Heizung über 35 °C liegt oder wenn Luftwärmepumpen bei sehr tiefen Temperaturen arbeiten müssen. Da die Vorlauftemperatur in der vorliegenden Siedlung schon bei Außentemperaturen unter 14 °C über 35 °C steigt und unter 0 °C aussen Vorlauftemperaturen über 55 °C benötigt, wird eine Wärmepumpenheizung in der Heizperiode nie die angegebene Maximalleistung abgeben können.

5.5 Eigenschaften von Holzpellets

Holzpelletkessel können im Vergleich mit anderen Holzheizungen deshalb sehr effizient arbeiten, weil die Eigenschaften der Pellets genormt sind und der Betrieb deshalb sehr regelmässig ablaufen kann. Die Norm DIN 51731 schreibt u.a. folgende drei Grössen vor, die für die Berechnung nützlich sind:

Schüttdichte ca. 650 kg/m³

Heizwert $H_U \geq 17.5 \text{ MJ/kg}$

Energiegehalt 4.9 - 5 kWh/kg

Die Werte sind der Tabelle 7.7 aus (Watter 2022, S. 215) entnommen. Der Wirkungsgrad moderner Pelletheizungen wird ebenda als 90 - 95% angegeben.

5.6 Aussentemperaturen

Auf der Website (www.winti-wetter.ch 2022) können Wetterdaten für Winterthur abgerufen werden. Die Daten reichen bis 2003 zurück, sind sehr detailliert und werden alle 10 Minuten aktualisiert. Auf der Website können unter „Statistik Details“ Tabellen mit durchschnittlichen Temperaturen, aufgelöst nach Tag, über den Zeitraum von einem Jahr eingesehen werden. Um die Temperaturen zu extrahieren, wurde die Website abgespeichert. Die Werte aus der Tabelle wurden maschinell ausgelesen und die Tage der Heizperiode herausgefiltert. Als Heizperiode galt die Zeit vom 18. September bis zum 18. Mai; ein Zeitraum von 8 Monaten oder 242 Tagen - wobei die genaue Auswahl des Zeitraums kaum einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Ausgewertet wurden die Jahre 2010 - 2021. Die Durchschnittstemperatur während der betrachteten Zeit lag bei 6.37 °C.

6 Berechnung des Energiebedarfs der Heizkonzepte

In diesem Kapitel wird auf Basis der Grundlagen und Daten aus früheren Kapiteln der Bedarf an Holzpellets bzw. Strom für die drei Heizkonzepte berechnet. Die Kalkulation der Holzpellettheizung ist dabei wesentlich einfacher und wird deshalb zuerst durchgeführt. Zur Berechnung wurde eine Excel-Tabelle verwendet, die auf dem beigelegten USB-Stick und im Anhang zu finden ist.

6.1 Bedarf an Holzpellets

Aus physikalischer Sicht unterscheidet sich eine Pelletheizung von einer Ölheizung nur durch den Brennstoff, verhält sich ansonsten aber exakt gleich. In Kapitel 5.1 wurde die von der Heizung jährlich benötigte Wärmemenge aus dem Ölverbrauch berechnet. Auf dem umgekehrten Weg wird nun aus dieser Energiemenge der Bedarf an Holzpellets berechnet. Die benötigte Menge m an Holzpellets (in kg), um eine bestimmte Menge Energie E zum Heizen zu erhalten, hängt von zwei Faktoren ab: Dem Wirkungsgrad η und der Energiedichte w . Berechnet wird sie mit

$$m = \frac{E}{\eta \cdot w} . \quad (6)$$

In diese Gleichung können nun die Zahlenwerte aus den Kapiteln 5.5 und 6.3 eingesetzt werden. Ausgewertet wird der obige Term mit ungünstigen, erwarteten und bestmöglichen Parametern. Berechnet wird die Menge an Holzpellets für ein kaltes, ein durchschnittliches und ein mildes Jahr. Die Ergebnisse sind Tabelle 1 zu entnehmen. Die beiden Extreme und der erwartete Pelletverbrauch sind fett gedruckt.

Grösse	Wahl der Parameter		
	ungünstig	erwartet	bestmöglich
η	4.9 kWh/kg	5.0 kWh/kg	5.0 kWh/kg
w	90%	90%	95%
m für kaltes Jahr (2013)	52'000 kg	51'000 kg	48'000 kg
m (Durchschnittliches Jahr)	46'000 kg	45'000 kg	42'000 kg
m für mildes Jahr (2014)	40'000 kg	39'000 kg	37'000 kg

Tabelle 1: Jährlicher Bedarf an Holzpellets für eine Pelletheizung

Die erwarteten 45'000 kg Pellets pro Jahr würden ein Volumen von 69 m³ benötigen. Laut Bernard Dubochet ist es realistisch, einen solchen Speicher anstelle des alten Öltanks einzubauen. Dieser alleine ist mit einem Fassungsvermögen von 60 m³ jedoch noch nicht ausreichend gross.

6.2 Vorgehen bei Wärmepumpenheizungen

Verglichen mit der Berechnung des Pelletbedarfs gestaltet sich das Bestimmen des Strombedarfs einer Erdsonde- oder Luft-Wärmepumpe sehr viel komplizierter. Hintergrund ist, dass hier der Energiebedarf bei tieferen Außentemperaturen nicht wie bei den Verbrennungsheizungen linear ansteigt, sondern ein komplizierteres Modell benötigt.

Mit den gegebenen Vereinfachungen kann bei den Wärmepumpen aus der Tagesdurchschnittstemperatur direkt der Stromverbrauch an diesem Tag berechnet werden. So könnte auf Basis der täglichen Tagestemperaturen von 2010-2021 für jeden einzelnen Tag in diesem Zeitraum bestimmt werden, wie viel Strom an diesem Tag benötigt worden wäre, wenn die Siedlung damals mit einer Wärmepumpenheizung beheizt worden wäre. Die Ergebnisse könnte man summieren und durch zwölf dividieren, um den Stromverbrauch in einem durchschnittlichen Jahr zu erhalten. Für eine übersichtlichere Berechnung wurde jedoch eine andere Methode gewählt:

Bei dieser Methode werden alle Tage, an denen die Temperatur in einem ähnlichen Bereich liegt, zusammengefasst. Dazu wird die Temperaturspanne von -10.5 °C bis 20.5 °C in 31 Kategorien unterteilt, die jeweils einen 1 °C breiten Bereich abdecken. Für jede dieser Kategorien wird gezählt, wie viele Tage pro Jahr in den entsprechenden Bereich fallen. So gibt es zum Beispiel pro Jahr durchschnittlich 12.7 Tage, an denen die Temperatur im Bereich von 0.5 °C bis 1.5 °C liegt. Für diese Kategorie würde nun ausgewertet, wie viel Strom an einem Tag, an dem es 1 °C kalt ist, benötigt wird, um eine Wärmepumpe zu betreiben. Das Ergebnis wird mit der Anzahl Tage in der entsprechenden Kategorie multipliziert, in diesem Fall also mit 12.7. Schliesslich werden die Ergebnisse aller Kategorien zusammengezählt, um den jährlichen Strombedarf zu erhalten. Erwähnenswert ist, dass nur die Tage zwischen dem 18. September und dem 18. Mai gezählt werden, weil die Heizung typischerweise nur in diesem Zeitraum in Betrieb ist. Abbildung 9 veranschaulicht das Konzept anhand der Verteilung der Tage in der Heizperiode auf die Temperaturen.

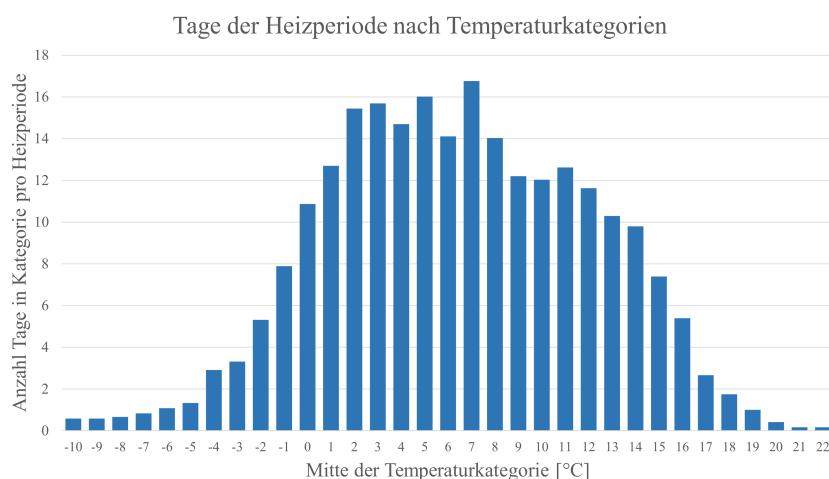


Abbildung 9: Verteilung der Tage im Jahr nach Temperaturkategorien
Berechnet mit Daten von (www.winti-wetter.ch 2022)

6.3 Benötigte Heizleistung bei einer gegebenen Temperatur

Um zu bestimmen, wie viel *Strom* eine Wärmepumpe an einem Tag benötigt, muss zunächst berechnet werden, wie viel *Wärme* sie an diesem Tag bereitstellen muss, d.h. wie stark geheizt werden muss, damit die Innentemperatur nicht absinkt. Es wird darauf verzichtet, den Tagesverlauf der Aussen- und Innentemperaturen dynamisch zu simulieren. Stattdessen wird von einem statischen Modell ausgegangen, was bedeutet, dass Aussen- und Innentemperatur konstant bleiben. Dazu müssen sich alle Prozesse, die einen Einfluss auf die Innentemperatur haben, ausgleichen. Diese wurden in Kapitel 3.1 aufgezählt; das hier verwendete Modell beruht jedoch auf der Vereinfachung, dass nur der Wärmeabfluss durch Wände, Fenster und Dach sowie der Wärmezufuss durch die Heizung berücksichtigt werden. Die anderen Faktoren lassen sich schlecht mit Messdaten stützen und voneinander abtrennen, schwanken teilweise stark und fallen bei der betrachteten Siedlung nicht sehr ins Gewicht.⁹

Der Wärmeabfluss durch Wände, Fenster und Dach wird durch Gleichung (1) aus Kapitel 3.1 beschrieben. Dass die Heizung ihn vollständig kompensieren muss, wird ausgedrückt mit

$$P_{\text{Heizung}} - (T_{\text{innen}} - T_{\text{aussen}}) \cdot A \cdot U = 0 .$$

A und U werden nun zu einem Faktor k zusammengefasst und auf die rechte Seite der Gleichung geschoben:

$$P_{\text{Heizung}} = (T_{\text{innen}} - T_{\text{aussen}}) \cdot k \quad (7)$$

Da sich weder die Aussenfläche, noch die Isolation ändert, kann angenommen werden, dass k konstant ist. Weil mit dem Wert von k aus der Aussentemperatur der Bedarf an Heizwärme berechnet werden kann, soll k nun bestimmt werden.

Die obige Gleichung beschreibt den Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt. Integriert man sie über die ganze Heizperiode, so ergibt sich die Energie, die die Heizung innerhalb der Heizperiode abgeben muss. Mit u als Dauer der Heizperiode wird das geschrieben als

$$\int_0^u P_{\text{Heizung}}(t) dt = E_a = \int_0^u (T_{\text{innen}} - T_{\text{aussen}}(t)) \cdot k dt .$$

Im nächsten Schritt werden alle Konstanten aus dem Integral genommen:

$$E_a = u \cdot k \cdot T_{\text{innen}} - k \cdot \int_0^u T_{\text{aussen}}(t) dt$$

Da die Daten für die Temperatur tageweise vorliegen, kann das Integral tageweise ausgewertet werden. Es wird deshalb nun durch eine Summe von Tagestemperaturen ersetzt. Daneben wird die ganze Gleichung durch u geteilt:

$$\frac{E_a}{u} = k \cdot \left(T_{\text{innen}} - \frac{\sum_{t=0}^u (T_{\text{aussen}}(t) \cdot 1 \text{ Tag})}{u} \right)$$

⁹Bei sogenannten Niedrigenergiehäusern ist das anders: Dank hervorragender Isolation können diese ihren Wärmebedarf zumindest im Herbst und Frühling ausschliesslich aus Wärmequellen im Haus und aus Sonneneinstrahlung decken.

Die Summe der Tagestemperaturen geteilt durch die Anzahl Tage ist nichts anderes als die Durchschnittstemperatur \bar{T}_{aussen} . Der Term kann durch diese ersetzt werden. Die Gleichung lautet nun

$$\frac{E_a}{u} = k \cdot (T_{\text{innen}} - \bar{T}_{\text{aussen}}) .$$

Das lässt sich umformen zu

$$k = \frac{E_a}{u \cdot (T_{\text{innen}} - \bar{T}_{\text{aussen}})} .$$

Nun müssen nur noch die Zahlenwerte eingesetzt werden:

$$k = \frac{201'600 \text{ kWh/Jahr}}{242.25 \text{ Tage/Jahr} \cdot (20^\circ\text{C} - 6.37^\circ\text{C})} = 61.06 \text{ kWh/Tag/K}$$

Der nun erhaltene Wert beschreibt, wie viel Energie der Wärmeerzeuger für die Heizung pro Kelvin Abweichung von 20°C an einem Tag liefern muss. So werden bei 0°C $61.06 \text{ kWh/Tag/K} \cdot 20 \text{ K} = 1221.2 \text{ kWh/Tag}$ benötigt, was pro Tag ungefähr 127 Litern Heizöl entspricht.

6.4 Strombedarf Erdsonde-Wärmepumpe

Im Gegensatz zu Öl- oder Pelletheizungen muss bei einer Heizung mit einer Erdsonde-Wärmepumpe nicht der gesamte Wärmebedarf aus Strom gedeckt werden, denn ein grosser Teil kann stattdessen dem Boden entzogen werden. Wieviel mehr Energie pro eingesetzter Einheit Strom bewegt werden kann, wird durch den Wirkungsgrad oder Coefficient of Performance (COP) beschrieben. Dessen Berechnung wurde in den Kapiteln 3.4 und 5.4 behandelt. Er hängt davon ab, auf welche Temperatur das Hezwasser erwärmt werden muss. Diese Temperatur ist die in den Kapiteln 3.3 und 5.2 behandelte Vorlauftemperatur. Diese wiederum hängt von der Außentemperatur ab. Deshalb muss auch der Strombedarf aus ihr berechnet werden. Die nötigen Grundlagen dafür wurden in früheren Kapiteln vorbereitet und können nun kombiniert werden:

Die benötigte Heizleistung bei gegebener Temperatur (Gleichung (7) aus Kapitel 6.3):

$$P_{\text{Heizung}} = (T_{\text{innen}} - T_{\text{aussen}}) \cdot k$$

Der maximal mögliche Wirkungsgrad nach Carnot (Gleichung (3) aus Kapitel 3.4):

$$\frac{|Q_H|}{|W|} = \frac{T_H}{T_H - T_K}$$

Die Vorlauftemperatur der betrachteten Siedlung (Gleichung (5) aus Kapitel 5.2):

$$T_V(T_{\text{aussen}}) = 20^\circ\text{C} + \text{Steilheit} \cdot 2.125 \cdot (20^\circ\text{C} - T_{\text{aussen}})^{0.78}$$

Die Größen sind:

- P_{el} Elektrische Leistung für die Wärmepumpe
- T_{innen} Innentemperatur
- T_{aussen} Aussentemperatur
- T_V Vorlauftemperatur der Heizung
- T_K Temperatur kaltes Reservoir für Wärmepumpe (hochgepumpte Sole)
- g Gütegrad der Wärmepumpe

Der COP der Wärmepumpe berechnet sich aus dem Carnot-Wirkungsgrad multipliziert mit der Güte g . Die Temperatur des warmen Reservoirs ist hier die Vorlauftemperatur der Heizung. Das kalte Reservoir entspricht der hochgepumpten Sole. Als Formel ausgedrückt ergibt sich:

$$COP(T_{\text{aussen}}) = \frac{T_V(T_{\text{aussen}})}{T_V(T_{\text{aussen}}) - T_K} \cdot g \quad (8)$$

Der Strom, den die Wärmepumpe benötigt, entspricht der abgegebenen Leistung geteilt durch den COP. Für die abgegebene Leistung wird gemäß Kapitel 6.3 die Differenz von Innentemperatur und Aussentemperatur multipliziert mit dem dort bestimmten Faktor k verwendet.

$$P_{\text{el}} = \frac{(T_{\text{innen}} - T_{\text{aussen}}) \cdot k}{COP(T_{\text{aussen}})} \quad (9)$$

Mithilfe von diesem Term kann nach den in Kapitel 6.2 erarbeiteten Prinzipien der jährliche Strombedarf bestimmt werden. Wie schon bei der Pelletheizung wird er mehrmals mit unterschiedlichen Parametern ausgewertet. Variiert werden die Temperatur T_K der hochgepumpten Sole und der Gütegrad g der Wärmepumpe.

	Wahl der Parameter		
Größe	ungünstig	erwartet	bestmöglich
T_{innen}	20 °C	20 °C	20 °C
Heizkurvensteilheit	1.65	1.65	1.65
T_K	3 °C	8 °C	11 °C
g	47%	52%	54%
E_{el} für kaltes Jahr (2013)	73'000 kWh	59'000 kWh	53'000 kWh
JAZ für kaltes Jahr (2013)	3.1	3.9	4.3
E_{el} (Durchschnittliches Jahr)	62'000 kWh	50'000 kWh	45'000 kWh
JAZ (Durchschnittliches Jahr)	3.2	4.0	4.5
E_{el} für mildes Jahr (2014)	52'000 kWh	41'000 kWh	37'000 kWh
JAZ für mildes Jahr (2014)	3.4	4.2	4.8

Tabelle 2: Jährlicher Strombedarf einer Erdsonde-Wärmepumpenheizung

Teilt man den jährlichen Energiebedarf durch den (berechneten) jährlichen Strombedarf, so erhält man die auf Seite 18 erklärte Jahresarbeitszahl (JAZ). Sie ist eine wichtige Größe, um die Effizienz und Wirtschaftlichkeit mit anderen Häusern, die eine Erdsonde verwenden, zu vergleichen.

Ein bisher nicht variiertes Parameter ist die Heizkurvensteilheit. Sollte es durch bessere Heizkörper gelingen, die Vorlauftemperatur etwas zu senken, könnte die Wärmepumpe mit einer niedrigeren Temperaturdifferenz arbeiten. Ohne dass sich am Wärmebedarf etwas ändern würde, liese sich der Stromverbrauch erheblich senken. Wird die Heizkurvensteilheit von 1.65 auf 1.5 gesenkt, steigt die JAZ von 4.0 auf 4.3, mit einer Heizkurvensteilheit von 1.3 sogar über 4.6.

6.5 Strombedarf Luft-Wärmepumpe

Die Berechnung von Luftwärmepumpen erfolgt nach demselben Prinzip wie jene der Erdsonden. Angepasst werden müssen nur zwei Parameter: Einerseits haben Luft-Wärmepumpen einen schlechteren Gütegrad. Zusätzlich ist aber die Temperatur am kalten Reservoir nicht konstant, sondern entspricht der Außentemperatur, weil die Außenluft als Reservoir genutzt wird. Der COP berechnet sich nun mit

$$COP(T_{\text{aussen}}) = \frac{T_V(T_{\text{aussen}})}{T_V(T_{\text{aussen}}) - T_{\text{aussen}}} \cdot g . \quad (10)$$

In der Übergangszeit ist die Luft wärmer als der Boden und eine Luftwärmepumpe arbeitet effizienter als eine Erdsonde. Einen Vergleich zwischen den Heizkonzepten bietet Abbildung 10. Ersichtlich wird, wie die Wärmepumpen mit abnehmender Temperatur ineffizienter werden und dass die Luft-Wärmepumpe stärker davon betroffen ist. Unterhalb von 0 °C sinkt ihr COP unter 2.5 und unterhalb von -6 °C wird zu einem Drittel mit Strom geheizt. Das Wärmepumpensystem muss darauf ausgelegt sein, auch in diesem Fall noch genug Leistung abgeben zu können.

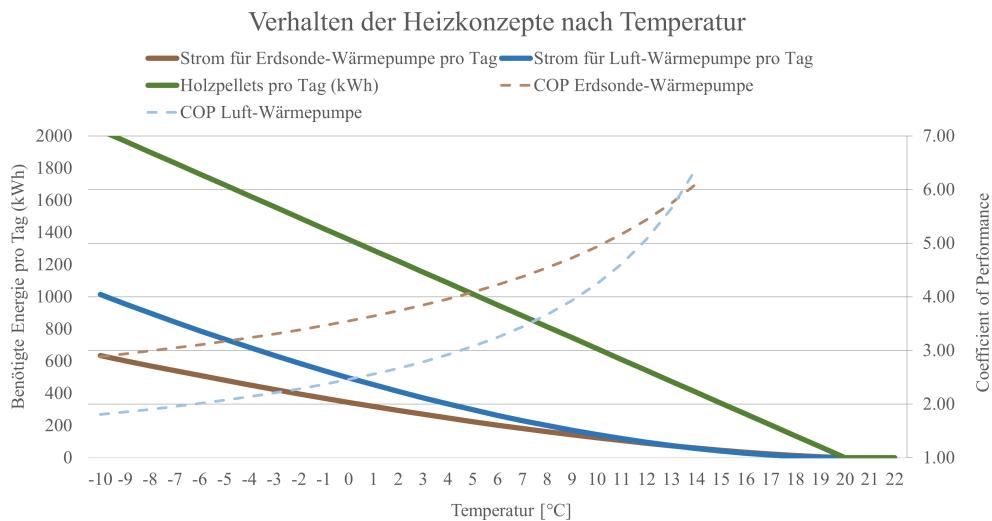


Abbildung 10: Täglicher Energiebedarf der drei Heizkonzepte und COPs von Erdsonde- und Luft-Wärmepumpen Quelle: Eigene Berechnung und Grafik

Die Auswertung des jährlichen Strombedarfs erfolgt nach demselben Schema wie bei einer Erdsonde, wobei hier als einziger Parameter die Güte variiert wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Erwartungsgemäss fallen sie schlechter aus als bei einer Erdsonde.

	Wahl der Parameter		
Grösse	ungünstig	erwartet	bestmöglich
T_{innen}	20 °C	20 °C	20 °C
Heizkurvensteilheit	1.65	1.65	1.65
g	38%	42%	47%
E_{el} für kaltes Jahr (2013)	91'000 kWh	82'000 kWh	73'000 kWh
JAZ für kaltes Jahr (2013)	2.5	2.8	3.1
E_{el} (Durchschnittliches Jahr)	75'000 kWh	67'000 kWh	60'000 kWh
JAZ (Durchschnittliches Jahr)	2.7	3.0	3.3
E_{el} für mildes Jahr (2014)	60'000 kWh	54'000 kWh	48'000 kWh
JAZ für mildes Jahr (2014)	2.9	3.3	3.6

Tabelle 3: Jährlicher Strombedarf einer Luft-Wärmepumpenheizung

7 Auswertung

Für ein durchschnittliches Jahr mit ausgeglichen gewählten Parametern ergaben sich Energieverbräuche von 50'000 kWh für Erdsonden, 67'000 kWh für Luftwärmepumpen und 45'000 kg Holzpellets für eine Pelletanlage. Die Jahresarbeitszahlen für die Wärmepumpen lagen bei 4.0 (Erdsonde) und 3.0 (Luft). Die Ergebnisse aus der Berechnung liegen in einem realistischen Bereich. Eine Feldstudie des Fraunhofer-Instituts zu Wärmepumpenheizungen in Bestandsgebäuden im Winter 2018/2019 ergab folgende Werte: „Diese Anlagen [Luftwärmepumpen] erreichten ohne Ausreisser (4,1 und 4,6) Jahresarbeitszahlen (JAZ) von 2,5 bis 3,8 bei einem Mittelwert von 3,1.“ Zu „Erdreich-Wärmepumpen“ hiess es: „Ohne den negativen Ausreisser (1,8) wurden JAZ zwischen 3,3 und 4,7 bei einem Mittelwert von 4,1 ermittelt.“ (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme 2020). Im Vergleich zwischen einem warmen und einem kalten Jahr wird deutlich, dass der Einfluss der Witterung so gross ist, dass er die Unterschiede durch die Wahl der Parameter überdecken kann.

Die Erdsonde-Wärmepumpen schneiden für die hohen Vorlauftemperaturen sehr gut ab. Gemäss den Nachbarn ist die Erde insbesondere tiefer unten überraschend warm, wodurch eine Wärmepumpe effektiv arbeiten kann. Im nächsten Umkreis haben die meisten Häuser bereits Erdsonden gebohrt, ohne dass sich der Boden abgekühlt hätte. Da kaum noch weitere Bohrungen zu erwarten sind, kann man hoffen, dass die Temperatur auf hohem Niveau stabil bleibt. Um die Vorlauftemperatur der Heizung zu senken, sind Investitionen in bessere Heizkörper bei einer Wärmepumpenheizung sinnvoll. In der Umfrage genossen Erdsonden den grössten Rückhalt.

Auch die Luftwärmepumpen erreichen überraschend gute Werte. Diese sollten aber durch zwei Aspekte, die in der Berechnung nicht berücksichtigt wurden, gedämpft werden: So wurde als Reservoirtemperatur jeweils von der Tagesdurchschnittstemperatur ausgegangen, während die Arbeitszeiten in der Praxis anders liegen können. Die jetzige Heizung ist vormittags am Intensivsten in Betrieb, also zu einem Zeitpunkt, zu dem die Aussenluft kälter ist als im Tagesschnitt. Nicht berücksichtigt wurde auch, dass die Wärmetauscherplatten der Wärmepumpe vereisen können und dann mit einem Heizaggregat wieder abgetaut werden müssen, was Strom verbraucht (Hadorn 2015, S. 31).

Die Pelletheizung hat die höchsten laufenden Kosten. Für eine vollständige Bewertung müssten die Einbaukosten und die Möglichkeiten für einen grösseren Speicher abgeklärt werden, denn allein mit einem Umbau des Öltanks wäre nicht genug Platz vorhanden, um mit einer Lieferung den ganzen Winter lang heizen zu können. Damit kann sie den Vorteil, dass die Umbaumaßnahmen ansonsten klein ausgefallen wären, nicht ausspielen. Unklar geblieben ist im Laufe der Arbeit, ob Brennstoff aus der Region langfristig zu günstigen Bedingungen bezogen werden kann. In diesem Fall wäre eine Holzheizung unschlagbar bezüglich „Unabhängigkeit & Versorgungssicherheit“ - jenem Kriterium, das laut Umfrage an erster Stelle steht. Während in der Arbeit durchgehend von Pellets gesprochen wurde, können auch andere Holzbrennstoffe wie etwa Hackschnitzel eingesetzt werden, sofern sie sich automatisch portionieren lassen und nicht von Hand nachgelegt werden müssen.

Abschliessend sollen die jährlichen Ausgaben für die einzelnen Heizkonzepte in einem durchschnittlichen Jahr verglichen werden. Die Daten in Abbildung 11 basieren auf der Tabelle zu den Energiepreisen, die der Hauseigentümerverband Schweiz auf seiner Website präsentiert, und den Stromtarifen in Winterthur. Die Kosten werden einmal mit den Preisen von 2021 und einmal mit denen der letzten Monate berechnet, weil sie dazwischen sprunghaft gestiegen sind. Selbstverständlich sind die absoluten Werte mit Vorsicht zu geniessen.

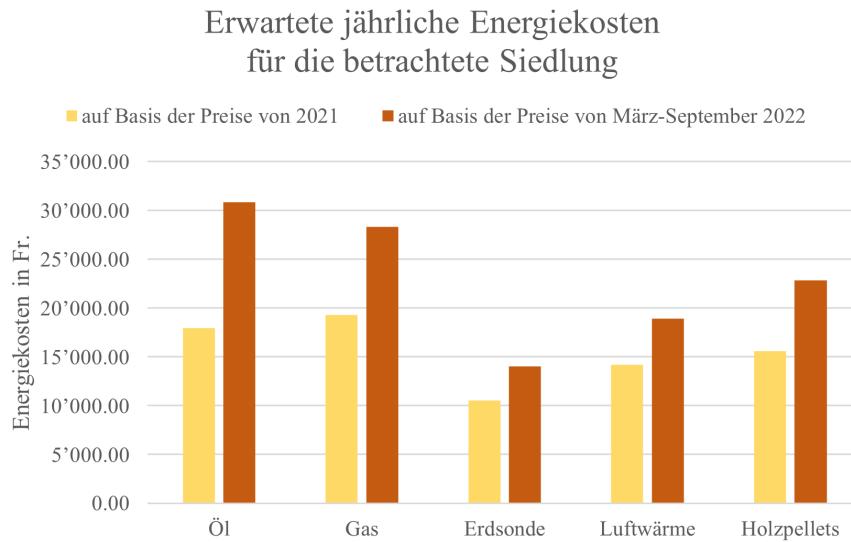


Abbildung 11: Jährliche Energiekosten ausgewählter Heizkonzepte für die betrachtete Siedlung; basierend auf den erwarteten Energieverbräuchen in einem durchschnittlichen Jahr aus Kapitel 6 Strompreise: (Stadtwerk Winterthur 2022b) Übrige Preise: (Hauseigentümerverband Schweiz 2022)

Sichtbar werden neben den allgemein gestiegenen Energiekosten die Unterschiede zwischen den Heizkonzepten. Die Erdsonde hat erwartungsgemäss deutlich tiefere Kosten als die anderen Heizkonzepte. Zur finanziellen Beurteilung müssen jedoch auch die Investitionskosten für den Einbau berücksichtigt werden. Diese werden noch einmal schwieriger zu beurteilen, wenn man die Möglichkeit berücksichtigt, mehrere Systeme zu kombinieren. Relativ gesehen gilt jedoch, dass eine fossile Heizung am günstigsten ist, gefolgt von der Luft-Wärmepumpe, der Pelletheizung und schliesslich einer Erdsondenbohrung (Kanton Zürich 2021). Im Betrieb gleichen sich die unterschiedlichen Einbaukosten aller Heizkonzepte durch die laufenden Energie- und Wartungskosten wieder aus.

8 Schlusswort

Diese Arbeit hat diverse Aspekte des Heizungsersatzes beleuchtet und vertieft. Allgemein konnte sie den anfänglich geplanten Themen folgen. Behandelt wurden die Rahmenbedingungen für den Heizungsersatz, die behandelten Heizkonzepte, die physikalische Modellierung von Heizungssystemen und deren Anwendung auf die Bacheggliweg-Reihenhäuser. Als Limitierungen für den Heizungsersatz konnten die räumlichen Bedingungen eines Bestandsbaus, die vorhandenen Heizkörper und die neue kantonale Gesetzgebung identifiziert werden. Vonseiten der Hauseigentümer ergab eine Umfrage, dass die Prioritäten bei Unabhängigkeit und Versorgungssicherheit, der Beibehaltung einer gemeinsamen Lösung für alle Häuser und einem tiefen CO₂-Ausstoss liegen.

Im theoretischen Teil spielten einerseits die Thermodynamik, andererseits die Haustechnik eine Rolle. Relevant waren insbesondere die Wärmeübertragung durch Flächen und der Carnot-Wirkungsgrad, der die Effizienz von Wärmepumpen limitiert. Im Laufe der weiteren Recherchen bestätigte sich, dass fossile Heizungen, ein Eisspeicher, ein Anschluss an ein Fernwärmennetz und ein Blockheizkraftwerk als Heizlösungen in der betrachteten Siedlung nicht möglich sein werden.

Um die zentralen Heizkonzepte besser zu beurteilen, wurde der jährliche Bedarf an Strom von Erdsonde- und Luft-Wärmepumpenheizungen sowie der Holzpelletverbrauch einer Pelletanlage berechnet. Dazu wurde ein Modell der betrachteten Überbauung aufgestellt, das darauf basiert, dass der Energiebedarf für einen Tag aus der durchschnittlichen Außentemperatur berechnet wird. Es sollte die zentralen Einflüsse berücksichtigen und mit gut abgestützten Parametern ausgewertet werden. Wichtig war dabei der Fokus auf die betrachtete Siedlung. Deshalb wurden Daten zur bestehenden Ölheizung und die jetzigen Heizkurve genutzt, Wetterdaten für Winterthur verwendet und Nachbarn nach deren Erdwärmtemperaturen gefragt. Die Ergebnisse sind gut abgestützt und erscheinen plausibel, basieren aber auf einer Reihe von Vereinfachungen. Sie enthalten eine gewisse Bandbreite sowohl bezüglich der Parameter als auch bezüglich der Witterung. Aufgrund der Daten aus der Berechnung konnten Aussagen über die laufenden Energiekosten gemacht werden.

Eine abschliessende Empfehlung lässt sich nicht aussprechen. Dies liegt daran, dass die Investitionskosten für eine neue Heizung nicht bekannt sind. Dazu müsste eine Offerte von einem Installateur eingeholt werden. Die von einigen Hauseigentümern vorgeschlagenen Erdsonden erscheinen attraktiv, weil sie trotz der hohen Vorlauftemperaturen der Siedlung sehr gut zu arbeiten scheinen. Als weiteres Ergebnis lassen sich manche Heizlösungen sehr wahrscheinlich ausschliessen.

Abschliessend hoffe ich, dass die vorliegende Arbeit den Bewohnern der Siedlung bei der Entscheidungsfindung helfen kann.

Danksagung

Mein Dank geht an meinen Betreuer Matias Meier Trüllinger, der mir immer wieder Impulse in die richtige Richtung gegeben hat.

Sehr hilfreich waren die lange gesammelten und schön aufbereiteten Daten zur Ölheizung, die Daniel Brunner und das Heizungs-Team der Siedlung erfasst haben. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Nachbarn, die sich Zeit genommen haben, den Fragebogen auszufüllen.

Wertvolle Informationen verdanke ich Bernard Dubochet von der Energieberatung von Stadtwerk Winterthur, der den Heizungsersatz von professioneller Seite erklärt hat.

Danke sagen möchte ich auch Annika Heider für das Korrekturlesen der Arbeit.

Zuletzt möchte ich mich herzlich bei meiner Familie bedanken: Meinem Vater für die Luftbilder und mehrmaliges Gegenlesen der Arbeit, meiner Mutter für die Hilfe zum Programm L^AT_EX, in dem ich die Arbeit geschrieben habe, und der ganzen Familie für die Geduld, die sie mir in schwierigen Phasen der Maturitätsarbeit immer wieder entgegengebracht hat.

Bücher

- Bonin, Jürgen (2017). *Handbuch Wärmepumpen : Planung und Projektierung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. ISBN: 9783410268680.
- Bußmann, Werner (2011). *Geothermie - Energie aus dem Innern der Erde*. Stuttgart: Fraunhofer Irb Verlag. ISBN: 9783816783213.
- Cutnell, J.D. et al. (2015). *Physics*. 10th ed. Wiley. ISBN: 9781118899205.
- Hadorn, Jean-Christophe, ed. (2015). *Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings*. Berlin: Wiley. ISBN: 9783433030400.
- Heße, Wolfgang (2020). *Energieeffiziente Wärmeversorgung von Gebäuden: Tatsächliche Versorgungsverhältnisse und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung*. 1st ed. Wiesbaden: Springer. ISBN: 9783658275709.
- Quaschning, Volker (2013). *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*. 8th ed. Hanser, München. ISBN: 978344643526.
- Sobotta, Stefan (2018). *Praxis Wärmepumpe : Technik, Planung, Installation*. 3rd ed. Berlin: Beuth Verlag GmbH. ISBN: 9783410272427.
- Watter, Holger (2022). *Regenerative Energiesysteme: Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme*. 6th ed. Wiesbaden: Springer. ISBN: 9783658234874.
- Wesselak, Viktor et al. (2013). *Regenerative Energietechnik*. 2nd ed. Berlin/Heidelberg: Springer. ISBN: 9783642241659.

Internetquellen

- Bundesamt für Energie (2022). *Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopp lung (WKK) in der Schweiz*. September 2022; Abgerufen am 04.11.2022. URL: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11113>.
- Bundesamt für Statistik (2022). *Gesamtenergiestatistik des Bundes 2021*. 08.07.2022; Abgerufen am 11.10.2022. URL: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html>.
- Bundesamt für Umwelt (2022). *Statistik des BAFU zu Treibhausgasemissionen durch Brennstoffe*. 11.07.2022; Abgerufen am 05.11.2022. URL: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/CO2_Statistik_Daten.xlsx.download.xlsx/CO2-Statistik-2022-07_DE.xlsx.
- Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz (2022). *Statistik zu verkauften Wärmepumpen 2021*. 02.05.2022; Abgerufen am 12.10.2022. URL: <https://www.fws.ch/statistiken/>.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (2020). *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden*. 23.07.2020; Abgerufen am 29.11.2022. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-03ET1272A-WPsmart\im\Bestand-Schlussbericht.pdf>.
- Hauseigentümerverband Schweiz (2022). *Energiepreise*. Abgerufen am 05.11.2022. URL: <https://www.hev-schweiz.ch/vermieten/statistiken/energiepreise/>.
- Hermann, Philipp (2020). *Heizkennlinie: Definition und Einflussfaktoren*. 18.05.2020; Abgerufen am 30.11.2022. URL: <https://heizung.de/heizung/wissen/heizkennlinie-definitioin-und-einflussfaktoren/>.

-
- Kanton Zürich (2021). *Abstimmungszeitung zur Kantonalen Volksabstimmung vom 28. November 2021*. Abgerufen am 25.10.2022. URL: https://www.zh.ch/bin/zhweb/public/regierungsratsbeschluss-unterlagen./2021/1032/Abstimmungszeitung\._2021-11-28.pdf.
- Kanton Zürich (2022a). *Erdwärmesonden*. Abgerufen am 30.11.2022. URL: <https://www.zh.ch/de/planen-bauen/bauvorschriften/energienutzung-untergrund-wasser/erdwaer-mesonden.html>.
- Kanton Zürich (2022b). *Wärmenutzungsatlas - GIS-Browser*. Abgerufen am 30.11.2022. URL: <https://maps.zh.ch/s/yfueq6wo>.
- Klapschus, Oliver (2022). *Preisrallye bei Holzpellets verschärft sich - Hoffnung vor dem Winter?* 28.07.2022; Abgerufen am 30.11.2022. URL: <https://www.heizpellets24.ch/news/artikel/001207>.
- Paschotta, Rüdiger (2020a). *Abgasverlust, erklärt im RP-Energielexikon*. 14.03.2020; Abgerufen am 24.10.2022. URL: <https://www.energie-lexikon.info/abgasverlust.html>.
- Paschotta, Rüdiger (2020b). *Heizwert, erklärt im RP-Energielexikon*. 31.03.2020; Abgerufen am 24.10.2022. URL: <https://www.energie-lexikon.info/heizwert.html>.
- Paschotta, Rüdiger (2022a). *Eisspeicher, erklärt im RP-Energielexikon*. 28.08.2022; Abgerufen am 03.11.2022. URL: <https://www.energie-lexikon.info/eisspeicher.html>.
- Paschotta, Rüdiger (2022b). *Zentralheizung, erklärt im RP-Energielexikon*. 02.01.2022; Abgerufen am 06.11.2022. URL: <https://www.energie-lexikon.info/zentralheizung.html>.
- Ryser, Roland, Dr. Heinrich Jäckli AG, and AWEL, Abteilung Gewässerschutz (n.d.). *Energienutzung aus Untergrund und Abwasser*. URL: https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/planen-bauen/bauvorschriften/energienutzung-aus-untergrund-und-wasser/mehr-zum-thema/planungshilfe\._waermenutzung.pdf.
- Stadt Winterthur (2022). *Kommunaler Energieplan Winterthur*. 30.06.2022; Abgerufen am 15.10.2022. URL: <https://stadt.winterthur.ch/gemeinde/verwaltung/stadtkanzlei/kommunikation-stadt-winterthur/medienmitteilungen-stadt-winterthur/revision-des-energieplans-fuer-die-waermeverversorgung-1/download/20220630-kommunaler-energioplan-winterthur.pdf>.
- Stadtwerk Winterthur (2022b). *Neue Tarifordnung und höhere Strompreise*. 26.08.2022; Abgerufen am 05.11.2022. URL: <https://stadt.winterthur.ch/gemeinde/verwaltung/stadtkanzlei/kommunikation-stadt-winterthur/medienmitteilungen-stadt-winterthur/neue-tarifordnung-und-hoehere-strompreise>.
- Wikipedia (2022a). *Eigenschaften des Wassers*. Abgerufen am 15.10.2022. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenschaften_des_Wassers.
- Wikipedia (2022b). *Heizöl*. Abgerufen am 15.10.2022. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Heiz\%C3%B6l\#Heiz\%C3%B6l_Extra_Leicht_\(HEL\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Heiz\%C3%B6l\#Heiz\%C3%B6l_Extra_Leicht_(HEL)).
- www.energie-experten.org (2022). *Die Pelletheizung: Technische Details, Kosten & Förderungen*. 14.08.2022; Abgerufen am 30.11.2022. URL: <https://www.energie-experten.org/heizung/pelletheizung>.
- www.haustechnikdialog.de (2004a). *Mathematische Gleichung für Heizkennlinie?* Gestartet am 03.03.2004; Abgerufen am 14.10.2022. URL: <https://www.haustechnikdialog.de/Forum/t/5591/Mathematische-Gleichung-fuer-Heizkennlinie->.

www.haustechnikdialog.de (2004b). *Spreizung erhöhen vs. Massenstrom reduzieren - Verständnisfrage*. Gestartet am 07.04.2004; Abgerufen am 15.10.2022. URL: <https://www.haustechnikdialog.de/Forum/t/6228/Spreizung-erhoehen-Massenstrom-reduzieren-Verstaendnisfrage>.

www.topten.ch (2022). *Die besten Wärmepumpen der Schweiz*. Abgerufen am 25.10.2022. URL: https://www.topten.ch/private/products/heat_pumps.

www.winti-wetter.ch (2022). *Aktuelle Wetterübersicht - Winterthur*. 01.07.2003; Abgerufen am 06.11.2022. URL: <https://www.winti-wetter.ch/>.

ZHAW - Institut für Facility Management (2010). *Umwälzpumpe optimieren*. 2010; Abgerufen am 27.09.2022. URL: <https://www.erdsondenoptimierung.ch/index.php?id=268892>.

Andere Quellen

Dubochet, Bernard (2022). *Gespräch mit Bernard Dubochet von der Energieberatung Winterthur*. 11. Oktober 2022. Stadtwerk Winterthur. URL: <https://stadtwerk.winterthur.ch/privatkundschaft/angebote/energieberatung>.

Stadtwerk Winterthur (2022a). “Infoveranstaltung Heizsysteme”. In: 27. Juni 2022. Stadtwerk Winterthur. Alte Kaserne Winterthur. URL: <https://ebw.ch/klimawoche>.

Anhang

Weitere Heizkonzepte

Die folgenden Heizkonzepte können aus unterschiedlichen Gründen in der betrachteten Siedlung nicht eingesetzt werden. Weil sie interessant zu behandeln sind, werden sie hier ebenfalls vorgestellt.

Fossile Heizungen

Zur Situation fossiler Heizungen im Kanton Zürich gibt die Abstimmungszeitung zum (angenommenen) Energiegesetz vom 28.11.2021 Auskunft (Kanton Zürich 2021). Derzeit wird noch mehr als die Hälfte der Öl- und Gasheizungen im Kanton Zürich am Ende ihrer Lebensdauer wieder durch eine fossile Heizung ersetzt. Mit Inkrafttreten des neuen Energiegesetzes am 1. September 2022 sind die Rahmenbedingungen dafür jedoch anders. Eine fossile Heizung darf nur noch eingebaut werden, wenn eine Lösung auf Basis von erneuerbarer Energie mehr als 5% teurer ist. Dabei werden nicht nur die Investitionskosten berücksichtigt, sondern auch die Betriebskosten über die gesamte Lebensdauer. Das ist insofern bedeutend, weil fossile Heizungen deutlich günstiger in der Anschaffung sind, die Bilanz über die gesamte Lebensdauer gesehen aber zugunsten der Erneuerbaren ausfällt. Da fossile Heizungen unwirtschaftlich, wahrscheinlich verboten, nicht nachhaltig und physikalisch nicht sehr spannend sind, werden sie nicht gesondert behandelt.

Eisspeicher

Der Eisspeicher ist eine eher selten eingesetzte Lösung. Das Prinzip besteht darin, dass ein sehr grosses Volumen an Wasser als Energiespeicher verwendet wird. Im Winter wird dem Wasser Wärme entzogen, sodass es nach und nach zu Eis gefriert. Einen Liter Wasser zu gefrieren setzt dabei so viel Energie frei, wie wenn Wasser um 80 °C abkühlt wird (Wikipedia 2022a). Man spricht dabei von der sogenannten *Latenten Wärme*. Deshalb wird der Eisspeicher auch *Lantentwärmespeicher* (Wesselak et al. 2013, Kapitel 10.2.2) genannt. Mit der daraus gewonnenen Energie und einer Wärmepumpe wird das Haus geheizt. Die Wärmepumpe hat dabei die gleiche JAZ wie eine Erdsonde-Wärmepumpe, deren kaltes Reservoir konstant 0 °C warm ist. Im Sommer wird der Eisblock mithilfe von Sonnenkollektoren wieder aufgetaut (Paschotta 2022a). Der Eisspeicher bietet eine grosse Unabhängigkeit. Nachteilig ist hingegen das grosse Volumen für den Speicher. Es errechnet sich als:

$$V_{Eis} = \left(E_a - \frac{E_a}{JAZ} \right) \cdot \frac{1}{h_{fusEis} \cdot \rho_{Eis}} \quad (11)$$

Der erste Term beschreibt hier die Energie, die im Eis gespeichert werden muss, nämlich den jährlichen Wärmebedarf abzüglich des Anteils, der aus dem Strom für die Wärmepumpe bezogen wird. Der zweite Term beschreibt die Wärme, die beim Gefrieren von 1 Liter Eis frei wird. Die Grössen und überschlägigen Zahlenwerte können Tabelle 4 entnommen werden.

Symbol	Beschreibung	Zahlenwert	Quelle Zahlenwert
E_a	Jährlicher Energiebedarf der Heizung	201'600 kWh	Kapitel 6.3
JAZ	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe	3.4	Siehe Text
h_{fusEis}	Wärme, um 1 kg Eis zu schmelzen	333.5 kJ/kg	(Wikipedia 2022a)
ρ_{Eis}	Dichte von Eis	0.917 kg/dm ³	(Wikipedia 2022a)

Tabelle 4: Überschlägige Parameter für einen Eisspeicher

Mit diesen Werten wird für die betrachtete Siedlung ein Speicher von mindestens 1700 m³ erforderlich. Der Öltank (60'000 Liter bzw. 60 m³) ist dafür bei weitem zu klein. Benötigt würde ungefähr zwei mal das Volumen der Tiefgarage der vorliegenden Überbauung. Gemäss der Solarpotentialkarte des Kanton Zürich (Kanton Zürich 2022b) genügt die Sonnenenergie von allen nach Süden ausgerichteten Dächern der Siedlung knapp, um das Eis im Sommer wieder zu schmelzen. Für die vorliegenden Häuser kommt ein Eisspeicher eher nicht in Frage, weil der Platz für den Speicher fehlt, zusätzlich auf allen Dächern Sonnenkollektoren installiert werden müssten und der Aufwand, in der bestehenden Siedlung die benötigten Leitungen zu legen, vermutlich gross ist.

Fernwärme

Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) produzieren konstant Abwärme. Anstatt sie nutzlos an die Aussenluft abzugeben, kann diese Wärme durch unterirdische Rohrleitungen kilometerweit verteilt und zum Heizen verwendet werden. Diese Energie ist in grossen Mengen kostengünstig verfügbar, der Wartungsaufwand wird von der Stadt übernommen und es entsteht kein Umweltschaden, da der Abfall sowieso verbrannt wird, die KVA über sehr gute Abgasreinigungen verfügt und die Wärme sonst ungenutzt verpufft. Fernwärme kann auch von einigen Kraftwerken und Fabriken bezogen werden. Der Hauptnachteil ist der grosse Aufwand, die Leitungen zu verlegen.

In Winterthur geht von der KVA in Grüze ein Fernwärmennetz aus. Das Quartier, in dem die betrachtete Siedlung liegt, wird in absehbarer Zeit nicht im erschlossenen Bereich liegen. Dies geht aus der Karte in Abbildung 12 hervor, die Teil des neuen Energieplans der Stadt Winterthur ist (Stadt Winterthur 2022). Laut Bernard Dubochet (Dubochet 2022) ist das Gebiet unattraktiv für Fernwärme. Einerseits sind Erdsonden gut möglich, dazu benötigen die vielen Einfamilienhäuser verglichen mit Mehrfamilienhäusern viel Platz - und dementsprechend lange Rohrleitungen - pro erschlossener Familie.

Kraft-Wärme-Kopplung

Es besteht die Möglichkeit, mit einem Brennstoff gleichzeitig zu heizen und Strom zu erzeugen. (Watter 2022, Kapitel 12) Um die im Brennstoff enthaltene chemische Energie in Strom umzuwandeln können u.a. ein Verbrennungsmotor oder eine Dampfturbine in Kombination mit einem Generator verwendet werden¹⁰. In der Praxis liegt der Wirkungsgrad dieses Prozesses bei maximal 50%. Von der ursprünglich im Brennstoff enthaltenen Energie geht also mehr als die Hälfte in Form von Wärme verloren. Deshalb wird in einem

¹⁰(Watter 2022) listet noch sieben weitere Wege dazu auf.

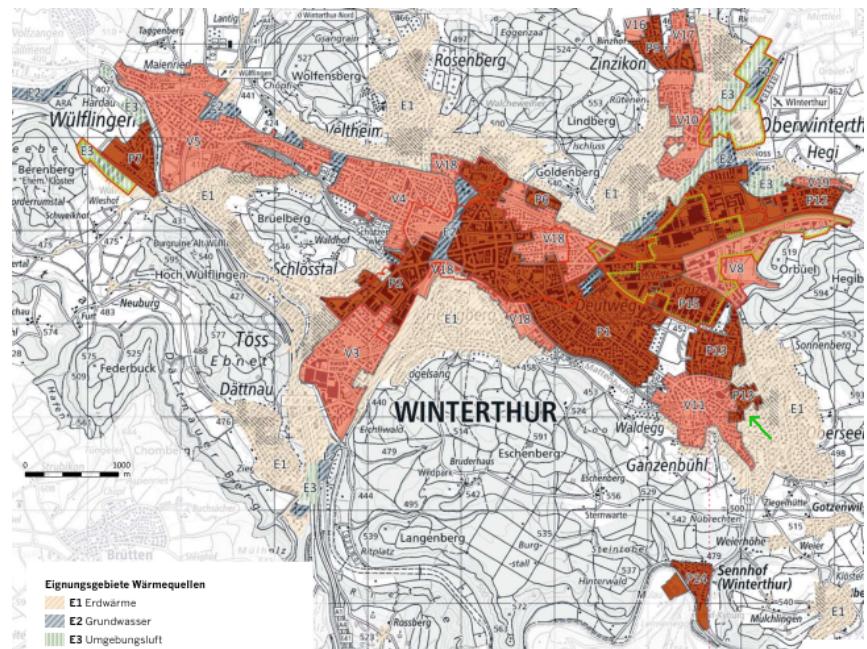


Abbildung 12: Auszug aus dem Energieplan 2022 der Stadt Winterthur. Die betrachtete Siedlung liegt an der Spitze des grünen Pfeils unten rechts und damit im (beigen) Gebiet E1, für das Erdsonden vorgesehen sind. Quelle: (Stadt Winterthur 2022)

sogenannten *Blockheizkraftwerk* (BHKW) ein Teil der Abwärme verwendet, um Gebäude zu heizen. So kann die im Brennstoff enthaltene Energie besser genutzt werden. Als Brennstoffe werden einerseits Diesel und Gas, Abfall in Kehrichtverwertungsanlagen, aber auch eine ganze Palette an erneuerbaren Brennstoffen aus Biomasse eingesetzt. Zu Brennstoff verarbeiten lassen sich nach (Quaschning 2013, Kapitel 9.1), (Wesselak et al. 2013, Kapitel 3.3) und (Watter 2022, Kapitel 7 und 8) u.a. Holz, Pflanzenöle, Gülle und Nutzpflanzen (über Biogas). Aus energetischer Sicht muss darauf hingewiesen werden, dass ein BHKW nicht heizt und als Nebenprodukt Strom anfällt, sondern dass im Vergleich zu einer reinen Heizung zusätzlicher Brennstoff benötigt wird. Würde statt der Ölheizung (die 21'000 Liter Heizöl im Jahr verbraucht) ein Diesel-BHKW eingerichtet werden, so würde dieses jährlich 31'000 Liter Diesel benötigen - 21'000 zur Wärmeproduktion und 10000 zur Stromproduktion.¹¹ Mehrere Gründe machen den Einbau eines BHKW in der betrachteten Siedlung unmöglich:

Weil Quellen von Biogas für die Siedlung nicht verfügbar sind, bleiben noch Diesel, Erdgas und Holz für den Betrieb eines BHKWs. Aus der Statistik des Bundes geht hervor, dass Stand Ende 2021 schweizweit keine einzige Kleinanlage mit Holzfeuerung in Betrieb war (Bundesamt für Energie 2022, Anhang D.1a). Zu Diesel heisst es dort: „Diesel/Heizöl-Klein-WKK-Anlagen sind nach kurzem[,] aber starkem Wachstum Ende der neunziger Jahre inzwischen wieder fast verschwunden.“ Erdgas hingegen wäre vor zehn Jahren noch eine realistische Option gewesen: Der alte Energieplan der Stadt Winterthur von 2011 empfahl für die Zone, in dem die betrachtete Überbauung liegt: „Zu sanierende Ölfeuerungen sollen durch Erdgas, vorzugsweise mit WKK-Anlagen [Wärme-Kraft-Kopplung] in Kleinverbunden oder Einzelanlagen ersetzt werden.“ Als Argumente wurden aufgeführt, dass

¹¹Heizöl Extra Leicht und Diesel sind chemisch fast identisch. Heizöl wird tiefer besteuert und enthält mehr Schadstoffe wie Schwefel (Wikipedia 2022b).

die Energie aus dem Erdgas so besser genutzt werden kann und der Strom für Wärmepumpen gebraucht werden könnte. Die BHKW sind jeweils dann in Betrieb, wenn geheizt werden muss, und produzieren folglich gerade dann viel Strom, wenn er am dringendsten für Wärmepumpen gebraucht wird. Der neue Energieplan (Juni 2022) sieht hingegen vor, dass das Gasnetz im Gebiet der vorliegenden Häuser bis 2033 abgeschaltet wird. Neue Anlagen zur direkten Stromproduktion aus fossilen Brennstoffen zu bauen wird zudem nicht mehr als zeitgemäß betrachtet.

Zum Thema Wirtschaftlichkeit steht in (Wesselak et al. 2013, Kapitel 2.3.3, S. 81f.): „Der Betrieb eines Blockheizkraftwerks ist nur dann wirtschaftlich, wenn im Jahr lange Laufzeiten bei Volllast erreicht werden können. [...] Aus diesem Grund werden BHKW i.d.R. nicht auf die Heizlast eines Gebäudes dimensioniert, sondern gemeinsam mit einem zusätzlichen konventionellen Wärmeerzeuger, dem Spitzenkessel, betrieben.“ Für BHKW, die nicht primär zur Strom-, sondern zur Wärmeproduktion eingesetzt werden, heißt es weiter: „Voraussetzung für den Betrieb eines wärmegeführten BHKW ist das Vorhandensein einer hohen thermischen Grundlast bei gleichzeitig hohem Strombedarf, wie es in einem Hallenbad oder einem Gewerbebetrieb der Fall sein kann.“ Weil es in der betrachteten Siedlung weder einen ganzjährigen Wärmebedarf, noch grosse Stromverbraucher gibt, passt das Anforderungsprofil nicht.

Für die Umsetzung vor Ort fehlt zudem der Platz, da der Heizkeller und Öltank auf einen Heizkessel und dessen Ölbedarf ausgelegt sind. Für ein BHKW müssten ein Motor, ein Generator, Steuerung und zusätzlich besagter Spitzenkessel eingebaut werden.

Dokumente

Die folgenden Dokumente sind auch auf <https://github.com/einmeterhecht/maturarbeit-sydow-corvin/anhaenge/> zu finden.

- Fragebogen an die Nachbarn (umfrage.pdf)
- Tabelle zum Ölverbräuchen der jetzigen Heizung, monatlich erfasst von 2010-2021 (oelstatistik.xlsx)
- COPs und Gütegrade ausgewählter Sole-Wasser- und Luft-Wasser-Wärmepumpen (waermepumpen.xlsx)
- Excel-Tabelle für die Berechnung aus Kapitel 6 (heizungssimulation_3.xlsx)

Liebe Nachbarn

Andere Kriterien:

Im Rahmen meiner Maturarbeit untersuche ich verschiedene Heizkonzepte für unsere Bacheggliweg-Siedlung. Wegen der neuen rechtlichen Rahmenbedingungen ist der Ersatz unserer Ölheizung ein Thema, mit dem wir uns in den nächsten Jahren auseinandersetzen müssen. Um einen Eindruck der Stimmung in der Siedlung zum anstehenden Heizungsersatz zu bekommen, wäre es hilfreich, wenn jedes Haus den untenstehenden Fragebogen ausfüllen und ihn in den Briefkasten vom 13c werfen könnte. Die Umfrage ist anonym.

Liebe Grüsse

5) Favorisieren Sie einen Heizungstyp? Sehen Sie einen Heizungstyp kritisch?

1) Wie dringend erscheint Ihnen ein Heizungsersatz?

- Sollte noch diesen Winter angegangen werden
- Abwarten, bis sich die Situation beruhigt hat
- Jetziges System möglichst lange am Laufen halten

2) Haben Sie schon privat Recherche zum Thema betrieben (Ja/Nein)?

3) Wie wichtig sind Ihnen folgende Kriterien bei der Wahl eines neuen Heizungstyps?

	Nebensächlich	Sehr wichtig			
Günstigste Lösung	1	2	3	4	5
Herkunft des Energieträgers					
Unabhängigkeit & Versorgungssicherheit					
Tiefer CO ₂ - Ausstoss					
Aufwand für Umbau gering halten					
Beibehaltung der gemeinsamen Lösung für alle Häuser (statt jedes Hauses für sich)					

6) Möchten Sie diesen Winter oder dauerhaft die InnenTemperatur senken (um Energie zu sparen)?

7) Haben Sie in den letzten Jahren (für die Heizung relevante) Umbauten durchgeführt?

- Dreifachverglasung
- Dach neu gedeckt und Isolierung verbessert
- Andere Massnahmen:

8) Platz für Bemerkungen:

Ölverbrauch (l)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Durchschnitt
	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember	
4'250	3'700	3'800	3'600	3'100	4'200	4'600	3'400	3'483	3'456	3'719	3'744		
3'250	3'000	4'300	4'100	2'000	3'500	3'000	3'100	3'600	3'216	2'425	2'947	3'226	
2'800	2'400	2'000	2'900	2'600	2'700	2'500	2'400	3'200	2'143	2'694	2'948	2'576	
1'450	1'000	1'750	1'700	1'200	1'000	2'300	2'100	1'507	1'876	1'778	1'875	1'606	
1'200	200	750	1'900	900	800	1'300	800	810	1'608	804	1'603	1'007	
350	0	370	850	100	400	200	0	0	268	268	268	255	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
400	0	530	150	260	300	200	700	700	268	955	803	536	
2'700	1'600	1'700	1'800	1'490	1'800	2'300	1'800	1'811	1'608	2'144	1'887	1'876	
2'600	2'950	2'700	3'200	2'550	2'200	2'900	3'100	2'679	2'680	2'680	NaN	2'749	
3'900	2'900	3'500	3'750	3'600	2'700	4'100	3'900	3'216	3'483	3'516	NaN	3'506	
Gesamt	22900	17750	21400	23950	18300	18500	23000	22500	20491	21320	20568	15'777.00	20970.8182

Name	Heizleistung bei B0/W35	B0W35	Güte (B0W35)	B0W55	Güte (B0W55)
Vaillant GmbH flexoTHERM exclusive VWF 87/4	8.8	4.8	55%	3.2	54%
Kibernetik AG STE 80-1	7.6	4.7	53%	3.2	54%
Domotec AG WPNS 100	10.4	4.8	55%	3.2	54%
alpha innotec WZSV 62H(K)3	5.95	4.86	55%	3.13	52%
Stiebel Eltron AG WPE-I 12 HK 230 Premium	12.05	4.6	52%	3.13	52%
Buderus SI 26TU	26.7	4.9	56%	3.1	52%
Buderus SIK 11TES	10.6	5	57%	3.1	52%
Heim AG Heizsysteme SI26TU	26.7	4.9	56%	3.1	52%
NIBE F1345 - 24	23	4.65	53%	3.09	52%
Howal AG Thermalia comfort (10)	10.6	4.81	55%	2.78	47%
CTA AG Optiheat OH 1-11es	10.6	4.7	53%	2.8	47%
Mittelwert	25.8	4.79	54%	3.08	52%

Name	Regli NovaAir	NIBE F2120-16	Swisstherm AG AWI 16 Dynamic	LWMi 1-30	Heim AG Mittelwert (Aller 8 WP)
Heizleistung A2/W35 (kW)	15.7	11	8.76	24.3	15.22
COP A7W35	5.4	5.12	4.9	4	4.64
Güte A7W35	49%	47%	45%	36%	42%
COP A2W35	4.6	4.27	4.21	3.6	3.92
Güte A2W35	49%	46%	45%	39%	42%
COP A-7W35	3.7	3.4	3.06	2.8	3.01
Güte A-7W35	50%	46%	42%	38%	41%
COP A7W55	3.5	3.25	2.85	2.6	3.05
Güte A7W55	51%	48%	42%	38%	45%
COP A2W55	3.2			2.4	2.80
Güte A2W55	52%	0%	0%	39%	45%
COP A-7W55	2.6	2.3	2.09	2.33	
Güte A-7W55	49%	43%	39%	0%	44%
Stiebel Eltron WPL 25 A	Vitocal 300-A [1-stufiger Betrieb]	Vitocal 300-A [2-stufiger Betrieb]	Viessmann Vitocal 300-A	Dimplex LA 25TU-2	Viessmann Vitocal 300-A
Heizleistung A2/W35 (kW)	8.33	15.2	27.6	10.9	
COP A7W35	5.09	4.3	4.1	4.2	
Güte A7W35	46%	39%	37%	38%	
COP A2W35	4.14	3.4	3.6	3.5	
Güte A2W35	44%	36%	39%	37%	
COP A-7W35	2.93	2.6	2.9	2.7	
Güte A-7W35	40%	35%	40%	37%	

Parameter	Wert	Einheit	Berechnete Werte	Wert Einheit	Beschreibung	Einheit	Summe
Anzahl Tage pro Heizperiode	242.25	Tag			Temperaturkategorie		
Durchschnittstemperatur	6.37	°C			% der Tage im Temperaturbereich	%	100%
Energiebedarf Siedlung pro Heizperiode	201600	kWh			Tag im Temperaturbereich pro Heizperiode	Tag	242.25
Heizgrenztemperatur	20	°C			Aussentemperatur (Mitte des Temperaturbereichs)	°C	-10.00
InnenTemperatur hier: gleich Heizgrenztemperatur	20	°C			Mitte des Temperaturbereichs	K	263.15
Heizkurvensteilheit	1.65				Benötigte Heizleistung für Siedlung	kWh/Tag	1831.69
Reservoirtemperatur für Erdsonde	8	°C			Benötigte Heizleistung für diese Temperatur pro Heizperiode	kWh	200876
Gütegrad Erdsonde-Wärmepumpe	52%				Vorlauftemperatur	°C	69.77
Güte Luft-Wärmepumpe	42%				Vorlauftemperatur in Kelvin	K	342.92
Jahresarbeitszahl Erdsonde-Wärmepumpe	4.02				COP Erdsonde-Wärmepumpe		2.89
Strombedarf Erdsonde pro Heizperiode	50009	kWh			Strombedarf pro Tag	kWh	634.53
Jahresarbeitszahl Luft-Wärmepumpe	2.98				Strombedarf für diese Temperatur pro Heizperiode	kWh	368.62
Strombedarf Luft-Wärmepumpe pro Heizperiode	67469	kWh			COP Luft-Wärmepumpe		1.81
Wirkungsgrad Pelletheizung	90%				Strombedarf pro Tag	kWh	1014.53
Energiedichte Holzpellets	5	kWh/kg			Strombedarf für diese Temperatur pro Heizperiode	kWh	67469
Schüttidichte Holzpellets	650	kg/m³			Holzpellets pro Tag	kg	44639
					Holzpellets für diese Temperatur pro Heizperiode	kg	236.47

	-9.5°C bis -8.5°C	-8.5°C bis -7.5°C	-7.5°C bis -6.5°C	-6.5°C bis -5.5°C	-5.5°C bis -4.5°C	-4.5°C bis -3.5°C	-3.5°C bis -2.5°C	-2.5°C bis -1.5°C	-1.5°C bis -0.5°C	-0.5°C bis 0.5°C	0.5°C bis 1.5°C
0.24%	0.27%	0.34%	0.45%	0.55%	0.60%	1.20%	1.37%	2.19%	3.25%	4.49%	5.24%
0.58	0.66	0.83	1.08	1.33	2.90	3.32	5.31	7.88	10.87	12.70	
-9.00	-8.00	-7.00	-6.00	-5.00	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00	0.00	1.00	
264.15	265.15	266.15	267.15	268.15	269.15	270.15	271.15	272.15	273.15	274.15	
1770.63	1709.58	1648.52	1587.47	1526.41	1465.35	1404.30	1343.24	1282.18	1221.13	1160.07	
1028.62	1135.03	1368.12	1712.68	2026.85	4256.37	4661.74	7134.49	10108.89	13275.84	14730.10	
68.47	67.17	65.85	64.52	63.18	61.82	60.46	59.08	57.69	56.28	54.86	
341.62	340.32	339.00	337.67	336.33	334.97	333.61	332.23	330.84	329.43	328.01	
2.94	2.99	3.05	3.11	3.17	3.24	3.31	3.38	3.46	3.55	3.64	
602.77	571.58	540.97	510.96	481.56	452.78	424.64	397.14	370.31	344.15	318.68	
350.17	379.48	448.96	551.27	639.44	1315.19	1409.65	2109.39	2919.56	3741.53	4046.52	
1.85	1.90	1.95	2.01	2.07	2.14	2.21	2.28	2.37	2.46	2.56	
956.07	899.04	843.45	789.33	736.70	685.58	635.99	587.97	541.53	496.70	453.51	
555.41	596.89	699.99	851.59	978.23	1991.38	2111.26	3122.93	4269.46	5339.98	5758.44	
393.47	379.91	366.34	352.77	339.20	325.63	312.07	298.50	284.93	271.36	257.79	
228.58	252.23	304.03	380.60	450.41	945.86	1035.94	1585.44	2246.42	2950.19	3273.35	

		2.5°C bis 2.5°C	3.5°C bis 3.5°C	3.5°C bis 4.5°C	4.5°C bis 5.5°C	5.5°C bis 6.5°C	6.5°C bis 7.5°C	7.5°C bis 8.5°C	8.5°C bis 9.5°C	9.5°C bis 10.5°C	10.5°C bis 11.5°C	11.5°C bis 12.5°C
6.37%	6.47%	6.06%	6.61%	5.82%	6.92%	5.79%	5.04%	4.97%	5.21%	4.80%		
15.44	15.69	14.69	16.02	14.11	16.76	14.03	12.20	12.03	12.61	11.62		
2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00		
275.15	276.15	277.15	278.15	279.15	280.15	281.15	282.15	283.15	284.15	285.15		
1099.01	1037.96	976.90	915.85	854.79	793.73	732.68	671.62	610.56	549.51	488.45		
16964.69	16280.63	14350.06	14659.29	12059.73	13306.24	10276.10	8193.52	7347.31	6931.81	5675.17		
53.42	51.96	50.48	48.99	47.47	45.92	44.36	42.76	41.13	39.46	37.75		
326.57	325.11	323.63	322.14	320.62	319.07	317.51	315.91	314.28	312.61	310.90		
3.74	3.85	3.96	4.09	4.22	4.37	4.54	4.73	4.93	5.17	5.43		
293.93	269.90	246.61	224.09	202.35	181.43	161.34	142.11	123.77	106.35	89.89		
4537.13	4233.37	3622.53	3589.27	2854.89	3041.48	2262.81	1733.64	1489.35	1341.54	1044.41		
2.67	2.79	2.92	3.08	3.25	3.44	3.67	3.93	4.24	4.61	5.07		
411.99	372.16	334.07	297.75	263.23	230.55	199.75	170.88	143.98	119.11	96.33		
6359.52	5837.48	4907.33	4769.12	3713.74	3864.93	2801.58	2084.66	1732.63	1502.57	1119.23		
244.23	230.66	217.09	203.52	189.95	176.39	162.82	149.25	135.68	122.11	108.54		
3769.93	3617.92	3188.90	3259.84	2679.94	2956.94	2283.58	1820.78	1632.74	1540.40	1261.15		

		12.5°C bis 13.5°C	13.5°C bis 14.5°C	14.5°C bis 15.5°C	15.5°C bis 16.5°C	16.5°C bis 17.5°C	17.5°C bis 18.5°C	18.5°C bis 19.5°C	19.5°C bis 20.5°C	20.5°C bis 21.5°C	21.5°C bis 22.5°C
4.25%	4.04%	3.05%	2.23%	1.10%	0.72%	0.41%	0.17%	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%
10.29	9.79	7.39	5.39	2.66	1.74	1.00	0.41	0.17	0.17	0.17	0.17
13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
286.15	287.15	288.15	289.15	290.15	291.15	292.15	293.15	293.15	293.15	293.15	293.15
427.39	366.34	305.28	244.23	183.17	122.11	61.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
4398.25	3587.52	2254.87	1317.45	486.44	212.82	60.81	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
36.00	34.18	32.30	30.34	28.26	26.02	23.51	20.02	20.02	20.02	20.02	20.02
309.15	307.33	305.45	303.49	301.41	299.17	296.66	293.17	293.17	293.17	293.17	293.17
5.74	6.10	6.54	7.06	7.74	8.63	9.95	12.69	12.69	12.69	12.69	12.69
74.43	60.02	46.71	34.57	23.68	14.15	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
765.97	587.78	345.02	186.48	62.88	24.65	6.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.65	6.40	7.41	8.89	11.24	15.67	27.65	7231.59	7231.59	7231.59	7231.59	7231.59
75.70	57.28	41.18	27.47	16.29	7.79	2.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
778.98	560.97	304.14	148.20	43.27	13.58	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
94.98	81.41	67.84	54.27	40.70	27.14	13.57	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
977.39	797.23	501.08	292.77	108.10	47.29	13.51	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00