



Florian Goebel

Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Wärmepumpen auf dem Mathildenhügel in Darmstadt

Bachelorthesis

h_da hochschule
darmstadt

member of
EU+T+
EUROPEAN UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Bachelorthesis zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science Wirtschaftsingenieurwesen
der Hochschule Darmstadt

Florian Goebel

Machbarkeitsstudie zur Nutzung von Wärmepumpen auf dem Mathildenhügel in Darmstadt

In Kooperation mit
dem Amt für Klimaschutz und Klimaanpassung Darmstadt
und der
Arbeitsgemeinschaft WEG Mathildenhügel

Kolloquium 16. April 2024

Referent Prof. Dr.-Ing. Sven Linow, sven.linow@h-da.de

Korreferent Dr. Oliver Kah, Stadt Darmstadt

doi: [10.48444/h_docs-pub-440](https://doi.org/10.48444/h_docs-pub-440)



Inhalt

1	Einleitung.....	5
1.1	Relevanz des Themas.....	5
1.2	Einführung in den Fall.....	5
1.3	Problematik.....	5
1.4	Zielsetzung der Arbeit.....	5
2	Stand der Technik.....	7
2.1	Grundlagen zur Heizlast	7
2.1.1	Wärmebedarf	7
2.1.2	Definitionen zur Heizlast	8
2.1.3	Berechnung der Heizlast.....	10
2.2	Auswahlfaktoren von Wärmepumpen	12
2.3	Betriebsarten von Wärmepumpen	14
2.3.1	Monovalente Betriebsweise	15
2.3.2	Bivalente Betriebsweise	17
2.4	Geologie und Hydrologie	18
2.5	Wärmequellen.....	20
2.5.1	Außenluft.....	20
2.5.2	Erdwärmekollektoren	21
2.5.3	Erdwärmesonden	23
2.5.4	Grundwasser.....	24
2.6	Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbewertung.....	26
3	Beschreibung der Liegenschaftsgebäude.....	29
4	Methodik	33
4.1	Datenaufbereitung	33
4.2	Annahmen bei der technischen und wirtschaftlichen Analyse.....	36
5	Auslegung der Wärmepumpensysteme	41
5.1	Heizlastanalyse der Gebäude heute	41
5.2	Heizlastanalyse der Gebäude nach Sanierung.....	43
5.3	Analyse der Geologie und der Hydrologie	44
5.4	Auslegungen der Wärmepumpen.....	46
5.4.1	Allgemeines graphisches und rechnerisches Vorgehen.....	47
5.4.2	Luft-Wärmepumpe	47
5.4.3	Sole-Wärmepumpe	50
5.4.4	Wasser-Wärmepumpe	52
5.5	Abschätzung verfügbarer Grundstücksfläche.....	54

5.6	Dimensionierungen der Wärmequellen	55
5.6.1	Erdkollektoren	55
5.6.2	Erdsonden	56
5.6.3	Grundwasserbrunnen	57
6	Wirtschaftliche Bewertung	59
6.1	Förderarten und Bedingungen	59
6.1.1	Bundesförderung	59
6.1.2	Städtische-/ und Hersteller-Förderung	61
6.2	Darlehensarten	61
6.3	Kostenanalyse der Wärmepumpensysteme	62
6.4	Kostenvergleich	64
7	Diskussion der Analyseergebnisse	68
8	Empfehlungen zur Umsetzung	73
9	Zusammenfassung	75
10	Literaturverzeichnis	77

1 Einleitung

1.1 Relevanz des Themas

Für das Erreichen der Klimaneutralität 2045 in Deutschland hat die Bundesregierung 2022 ein Gesetz vorgelegt, welches Kommunen ab 20.000 Einwohner verpflichtet einen kommunalen Wärmebedarfsplan aufzustellen. Ein Wärmebedarfsplan beinhaltet den aktuellen, sowie den zukünftigen Wärmebedarf der Kommune. Außerdem werden Potenziale für die Erzeugung erneuerbarer Energien mit Wärmepumpen ermittelt (Landes Energie Agentur Hessen, 2024). Aus den Potenzialen lassen sich innerhalb der Kommune stadtteil-/ oder gebäudespezifisch Teilmaßnahmen für eine mögliche Umsetzung ableiten. Diese Maßnahmen bestehen aus Sanierungen, dem Aufbau und der Erweiterung von Wärmeverbundlösungen und spezifische Einzellösungen. Zudem dient die Potenzialermittlung einer zukünftigen effizienten Koordination von Planung, Umsetzung und Förderung. Über die Stadtwerke können die Kommunen zielgerichtet Wärmenetze neu bauen oder ausbauen (Landes Energie Agentur Hessen, 2020).

1.2 Einführung in den Fall

Im Bundesland Hessen betragen die CO₂-Emissionen von ca. 1,4 Millionen Wohngebäuden 26 % an den Gesamtemissionen. An den Dimensionen ist zu erkennen, dass ein hohes Dekarbonisierungs-Potenzial im Wohnungssektor besteht. Dies bestätigt auch das Umweltbundesamt, welches von Einsparungen im Wärmebereich bei Wohngebäuden von bis zu 60 % ausgeht. Es besteht vor allem bei Eigentümern und Kommunalunternehmen ein hoher Handlungsbedarf, um die vollständige Dekarbonisierung im Gebäudesektor bis zum Jahr 2045 erreichen zu können. Mit Hilfe des Wärmebedarfsplans strebt das Bundesland Hessen eine Verdopplung der Sanierungsrate von derzeit 1 % pro Jahr an, um die Klimaneutralität bis 2045 erreichen zu können. Zur Erreichung der Ziele müssen im Durchschnitt alle Gebäude auf das energetische Niveau des KfW Effizienzhauses 55 saniert werden. (Landes Energie Agentur Hessen, 2020)

1.3 Problematik

In Deutschland und Hessen stellen Gebäude mit den Baujahren 1918 bis 1978 den Hauptanteil des gesamten Gebäudebestands dar. Gerade diese Gebäude weisen einen hohen Wärmebedarf auf, weshalb viele Eigentümer die mögliche Nutzung von erneuerbaren Energien in Ihren Gebäuden für unwirtschaftlich halten (Diefenbach et al., 2010). Jedoch haben sich die technischen Bedingungen und wirtschaftlichen Förderungen in den letzten Jahren weiterentwickelt (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022).

Unter diesen Bedingungen machen sich auch die Eigentümer mehrerer Gebäude an der Mathildenhöhe in Darmstadt Gedanken, inwiefern die zukünftige Nutzung von erneuerbaren Energien in den Gebäuden möglich ist. Unter der Vermittlung des Amts für Klimaschutz und Klimaanpassung Darmstadt wurde diese Analyse als wissenschaftliche Arbeit an Herrn Prof. Dr. Linow (Lehrgebiet: Wärmelehre und Umwelttechnik) herangetragen.

1.4 Zielsetzung der Arbeit

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die technische und wirtschaftliche Bewertung eines Heizungs-austauschs in den Gebäuden der Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel von fossilen Brennstoffen zu Wärmepumpen in Darmstadt. Dazu werden verschiedene Betriebsarten und Wärmequellsysteme hinsichtlich der Eignung auf dem Gelände für den Heizbetrieb analysiert. Diesem Kapitel folgt ein wirtschaftlicher Vergleich der Wärmepumpen als Wärmequelle

mit den aktuellen Heizkosten. Abschließend sollen Schlussfolgerungen aus den Analysen gezogen und eine Handlungsempfehlung für die mögliche Umsetzbarkeit des Heizungstauschs abgeleitet werden.

In dieser Arbeit wird die potentielle Wärmequelle Fernwärme nicht betrachtet. Begründet liegt dies in einer Mitteilung des Energieversorgers in Darmstadt an die Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel. In dieser Mitteilung ist zu lesen, dass die Heizleistung der Fernwärme im Fernwärmenetz an dem nächst gelegenen Anschlussstandort nicht mehr für die Beheizung weiterer Gebäude ausreicht. Es erfolgt keine technische und wirtschaftliche Betrachtung des Themas Fernwärme (Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel, 2024).

2 Stand der Technik

Innerhalb dieses Kapitelblocks werden die technischen und wirtschaftlichen Grundlagen erläutert, welche für eine Auslegung und Dimensionierung der Wärmepumpen benötigt werden. Für die Mehrzahl der Heizlastberechnungsverfahren ist der Wärmebedarf als grundlegender Berechnungsparameter für die Auslegung nötig, weshalb der Begriff des Wärmebedarfs und die Heizlastverfahren vorgestellt werden. Für ein Verständnis der technischen Begriffe und Faktoren in den Datenblättern der Hersteller werden anschließend die Auswahlkriterien und die möglichen Betriebsarten einer Wärmepumpe erklärt. Nach der Erläuterung der technischen Grundbegriffe, werden die möglichen Wärmequellen für Wärmepumpen und deren Auslegungsparameter behandelt.

2.1 Grundlagen zur Heizlast

Für die Berechnungsgrundlage werden in diesem Abschnitt der Begriff des Wärmebedarfs und darauf aufbauend der Begriff der Heizlast vorgestellt.

2.1.1 Wärmebedarf

Der Begriff Wärmebedarf ist definiert als *„die Wärmemenge, welche benötigt wird, um einen Wohnraum auf eine bestimmte Temperatur zu erwärmen und die Temperatur konstant zu halten“* (Hartmann, 2006, S. 35).

Der Heizwärmebedarf \dot{Q}_{HL} , den das Heizungssystem decken muss, richtet sich nach dem für die Bewohner empfundenen komfortable Raumtemperaturniveau (Bohne, 2022). Diese Wärmemenge besteht in Ein- und Mehrfamilienhäusern aus den beiden Bedarfsanteilen Heizwärme und Trinkwasser. In Häusern mit Öl- oder Gaskesseln übernimmt die Heizung die Bereitstellung beider Wärmemengen. Dabei hängt die Warmwassermenge für das Trinkwasser grobenteils von der Anzahl der im Gebäude wohnenden Personen ab, während die Heizwärme von dem bauphysischen Zustand der Gebäudehülle bestimmt ist (Bauer et al., 2018). Unter der Gebäudehülle versteht man die äußere Umschließungsfläche eines Gebäudes, welche im direkten Austausch von Wärme mit den äußeren Umgebungsbedingungen stehen. Gekennzeichnet ist der Wärmeaustausch durch die Wärmeübertragung in den Wänden. Es existieren verschiedene Materialien, welche die Übertragung an die Umgebung verringern oder erhöhen (Hartmann, 2006). Je schlechter ein Gebäude gedämmt ist, desto mehr Wärme verliert die Gebäudehülle an die Umgebung. Somit ist der Wärmebedarf zudem abhängig von der vorliegenden Außentemperatur (Bauer et al., 2018).

Die Vorlauftemperatur der Heizung hängt von der Wärmeabgabe der Heizkörper und damit von dem Wärmebedarf eines Gebäudes ab. Dabei wird die Vorlauftemperatur so eingestellt, dass die Wärmeabgabe der Heizkörper den Wärmebedarf des gesamten Gebäudes deckt. Je höher die Vorlauftemperatur der Heizung, desto größer der Wärmebedarf des Gebäudes. Somit ergeben sich definierte Verhältnisse zwischen der Vorlauftemperatur und der Außentemperatur für jedes Gebäude (Pistohl, 2013). Wie diese Abhängigkeit zu beschreiben ist, hängt von der Energieeffizienz des Gebäudes ab. Je besser dieses gedämmt ist, desto flacher ist die Heizkurve (Heße, 2020). Für eine vereinfachte Rechnung können diese Heizkurven als Geradengleichungen approximiert werden (Pistohl, 2013).

In der Literatur existieren zwei Ansätze für die Ermittlung des Wärmebedarfs. Entweder werden die realen Wärmeverbrauchsdaten an den Zählern abgelesen oder der Wärmebedarf wird nach der DIN 18599 berechnet (Ackermann, 2019). Mit der DIN 18599 wird der benötigte Nutzwärmebedarf für die Räume des Gebäudes unter definierten Randbedingungen berechnet. In

den Randbedingungen sind Raumtemperaturen, Beleuchtung, Warmwasser, sowie der Luftbedarf normiert, um alle Gebäude in Deutschland bezüglich Ihres Nutzwärmebedarfs miteinander vergleichen zu können. Aus der Nutzenergie und der Addition von Verluste durch Verteilung, Übergabe und Speicherung der Energie, ergibt sich die Endenergie. Da eine Wärmepumpe eine höhere Effizienz aufweist, als ein Gaskessel, sinkt bei Einbau einer Wärmepumpe der Endenergiebedarf bei gleichbleibendem Wärmebedarf des Gebäudes, siehe DIN V 18599-1. Der Endenergiebedarf ist für jedes Gebäude auf dem Energieausweis innerhalb einer Skalierung von Gebäudeklassen angegeben.

Bei den Energieausweisen wird unterschieden zwischen dem Verbrauchs- und Bedarfsenergieausweis. Der Unterschied zwischen den Energieausweisen ist die Datengrundlage. Während der Bedarfsenergieausweis auf normierten Verbrauchsdaten der DIN 18599 beruht, werden bei einem Verbrauchsenergieausweis die realen Verbrauchsdaten genutzt (Ackermann, 2019).

2.1.2 Definitionen zur Heizlast

Für die Auslegung und Auswahl von Wärmepumpen, Rohrsystemen und Brennstofflagerräumen wird die Heizlast benötigt (Bohne, 2022). Unter der Heizlast Φ_{HL} versteht man „eine Gebäudeeigenschaft, die angibt, welche Wärmemenge pro Zeiteinheit (= in W bzw. kW) zugeführt werden muss, um bei vorgegebenen winterlichen Norm-Witterungsbedingungen die Wärmeverluste zu decken und im Inneren des Hauses die geforderten Norm-Innenraumtemperaturen zu gewährleisten“ (Pistohl, 2013, H19). Als Norm-Witterungsbedingungen werden die Norm-Außentemperaturen bezeichnet (Pistohl, 2013). Die Definition der anzuwendenden Norm-Außentemperatur und der Norm-Innentemperatur erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt in diesem Kapitel. Somit gibt die Heizlast die Leistung und damit die Größe der Heizungsanlage vor, um den Wärmebedarf des Gebäudes zu decken. Des Weiteren dient die Heizlast als Grundlage für die wirtschaftliche Bewertung und den Betrieb der Heizungsanlage (Glaesmann, 2022).

Beeinflusst wird die Heizlast von den Wärmeverlusten der Gebäuderäume, der Flächengröße der Wände, sowie der äußeren Witterungsverhältnisse. Auch die Lage des Gebäudes und das Lüftungsverhalten der Bewohner sind zu berücksichtigende Faktoren, welcher die Heizlast beeinflusst. Je nach Außentemperatur muss die Heizungsanlage eine gleichmäßige Erwärmung in den einzelnen Wohnungen sicherstellen. Dabei darf die berechnete Heizleistung unter Normbedingungen und die real benötigte Heizleistung, um alle Räume gleichmäßig zu erwärmen, nur gering voneinander abweichen. Bei zu großen Abweichungen unterkühlen oder überhitzen einzelne Räume. Die zentrale Aufgabe der Heizlastberechnung ist die Kalkulation für eine gleichmäßige Heizleistung in jedem Raum des Gebäudes. Berechnet wird die Heizleistung nach der europäischen Norm DIN EN 12831, welche die deutsche DIN 4701 abgelöst hat (Bender & Göhlich, 2020). Diese exakte Heizlastberechnung ist von Seiten der Antragssteller als Bedingung für eine wirtschaftliche Förderung von Wärmepumpen durchzuführen (Bundesministerium der Justiz, 2023).

Außerdem soll somit eine Unter- oder Überdimensionierung der Wärmepumpe vermieden werden. Es existieren verschiedene Näherungsverfahren für die Berechnung der Heizlast, welche in Vorplanungen und Abschätzungen eingesetzt werden. Bei den Näherungsverfahren existieren die Heizlastberechnung über den Endenergieverbrauch, die Heizlastberechnung über Wohnfläche und Baujahr des Gebäudes und verschiedene Verfahren, die den Energiever-

brauch als Berechnungsgrundlage nutzen (Glaesmann, 2022). Gerade die Nutzung von Näherungsverfahren über die Wärmebedarfsdaten sind kritisch zu beurteilen, da Kesselanlagen früher häufig überdimensioniert eingebaut wurden (Bauer et al., 2018).

Im Folgenden werden die Begriffe für das Verständnis der DIN EN 12831, sowie den Näherungsverfahren für die Berechnung der Heizlast vorgestellt und eindeutig bestimmt. Als Begriffe, welche einen Großteil der Verfahren betreffen, werden die Norm-Außen-, die Norm-Innen-, sowie die Heizgrenztemperatur und der Wärmeverlustkoeffizient erläutert. Für das Verständnis der DIN EN 12831 werden neben dem Wärmeverlustkoeffizienten, die Transmissions- und Lüftungsverluste, sowie der Aufheizzuschlag benötigt. Aufbauend auf der Norm-Außen- und der Heizgrenztemperatur wird der Begriff der Gradtagzahl definiert. Zudem werden für drei Näherungsverfahren die Begriffe der Vollbenutzungsstunden und des Jahresnutzungsgrades beschrieben.

Norm-Außen- und Norm-Innentemperatur Als Norm-Außentemperatur ϑ_a wird die tiefste durchschnittliche Temperatur bezeichnet, welche an zwei nacheinander folgenden Tagen 10-mal erreicht wurde. Diese Temperatur ist im Beiblatt der DIN TS 12831-1 vermerkt. Dabei wird für jedes Postleitzahlgebiet eine Norm-Außentemperatur angegeben (Glaesmann, 2022).

Die Norm-Innenraumtemperatur ϑ_i unterscheidet sich je nach zu nutzendem Raum. So beträgt die Temperatur in Schlafräumen 20 °C, in Räumen, welche unbedeckt genutzt werden, 24 °C nach DIN EN 12831-1.

Heizgrenztemperatur Die Heizgrenztemperatur ϑ_{HG} bezeichnet die Temperatur im Innenraum eines Gebäudes, ab welcher die Heizung Wärmeenergie bereitstellen muss, damit die Innenraumtemperatur unabhängig von der Norm-Außentemperatur konstant bleibt. Nach der DIN TS 18599-12 werden für Wärmepumpen drei mögliche Heizgrenztemperaturen (10 °C / 12 °C / 15 °C) angegeben. Je nach energetischen Standards der betrachteten Gebäude ist die Wahl einer bestimmten Heizgrenztemperatur sinnvoll. Je höher der Sanierungsgrad, desto geringer liegt die Heizgrenztemperatur.

Wärmeverlustkoeffizient Der Wärmeverlustkoeffizient HLC eines Gebäudes beschreibt den Gesamtwärmeverlust aller Räume durch eine Temperaturdifferenz ΔT zwischen Norm-Innen- und Norm-Außentemperatur. Beeinflusst wird der Wärmeverlustkoeffizient durch die U-Werte der einzelnen Bausubstanzen und der Wandfläche für die Wärmeübertragung.

Der U-Wert gibt den Wärmestrom durch eine 1 m² große Wandfläche in Folge einer Temperaturdifferenz an. Der Wärmedurchgangskoeffizient beschreibt also die Wärmedurchlässigkeit eines Bauteils (Kaltschmitt et al., 2020). Für verschiedene Gebäudeelemente sind die U-Werte in den Tabellen der DIN V 18599-2 hinterlegt. Mit den Werten und den Gebäudeflächen, lässt sich der Wärmeverlust eines Gebäudes gegenüber der Umgebungstemperatur berechnen.

Aufbauend auf diesen erläuterten Grundbegriffsdefinitionen werden die zentralen Begriffe der DIN EN 12831 erläutert. Innerhalb der DIN EN 12831 besteht die Gesamtheizlast eines Gebäudes aus den Transmissionswärmeverlusten, den Lüftungsverlusten und einem Aufheizzuschlag (Bender & Göhlich, 2020).

Transmissionsheizlast Unter der Transmissionsheizlast $\Phi_{T,build}$ sind alle Wärmeverluste innerhalb einer definierten Zeitkonstante über die äußeren Umschließungsflächen des Gebäudes definiert (Hartmann, 2006). Die Berechnung der Gesamttransmissionsverluste erfolgt über die Transmissionswärmedurchgangskoeffizienten mit der Multiplikation der Außenfläche und der Differenz zwischen Norm-Innen- und Norm-Außentemperatur. Da innerhalb eines Ge-

bäudes nicht in allen Räumen dieselbe Norm-Innentemperatur vorliegt, werden die Transmissionsdurchgangskoeffizienten durch Korrekturfaktoren ergänzt. Beispielsweise wird nach DIN EN 12831-1 bei den Korrekturfaktoren zwischen verschiedenen Gebäudehöhen und innen liegenden Treppenhäusern unterschieden, welche nicht separat beheizt werden.

Lüftungsheizlast Die Lüftungsheizlast $\Phi_{V,build}$ beinhaltet die Lüftungswärmeverluste durch das Öffnen und Schließen von Fenstern und Türen, sowie der Luftdurchlässigkeit der Gebäudeaußenwände (Bohne, 2022). Beeinflusst werden die Lüftungsverluste hauptsächlich von dem ausgetauschten Luftvolumenstrom. Es wird unterschieden zwischen einem mechanischen Volumenstrom durch eine Abluftanlage und einem Volumenstrom durch direkten Luftaustausch mit der Umgebung (Pistohl, 2013). Für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudewände ist der Standort des Gebäudes und die Gebäudehöhe ausschlaggebend. Exponierte Lagen weisen höhere Luftdurchlässigkeiten auf. Je nach Lüftungsverhalten der Bewohner kann in der Realität die Lüftungsheizlast höher als die Transmissionsheizlast sein (Bohne, 2022).

Aufheizleistung Sind Räume nicht dauerhaft geheizt, so wird eine Heizleistung benötigt, um die Norm-Innenraumtemperatur wieder zu erreichen. Dabei kann es sich um unregelmäßig genutzte Räume oder einer Nachtabsenkung der Heizung handeln. Abhängig ist die Aufheizleistung $\Phi_{hu,i}$ von der Wärmekapazität der Raumelemente und der Temperaturdifferenz zu der Norm-Innentemperatur, siehe DIN EN 12831-1.

Gradtagzahl Die Gradtagzahl GTZ bezeichnen standortbezogen die Summe an Tagen (Gradtagen) in einem Auswertungszeitraum, an welchen die mittlere Tagestemperatur unter der Heizgrenztemperatur liegt, siehe VDI 3087-1. Die Berechnung der einzelnen Gradtage erfolgt indem „die Differenz zwischen der mittleren Rauminnentemperatur von 20 °C und dem Tagesmittel der Außentemperatur“ gebildet wird, siehe VDI 3087-1, S. 13. Angewendet werden die Gradtagzahlen in der Vorhersage für den Energieverbrauch eines Gebäudes, sowie der Überwachung des Energieverbrauchs aktueller Gebäude (Hitchin, 1981).

Vollbenutzungsstunden oder Jahresvolllaststunden Unter diesen Begriffen, versteht man die Anzahl an Stunden pro Jahr, an denen ein Kessel mit maximaler Leistung im Dauerbetrieb für die Deckung der benötigten Gesamtjahresheizlast betrieben werden müsste. Abgekürzt werden die Jahresvolllaststunden mit der Variablen b_{VH} . Für Mehrfamilienhäuser liegt die Variable in einer Größenordnung von 2000 h (Pistohl, 2013). Einfamilienhäuser liegen bei durchschnittlichen Werten zwischen 1800 h und 2100 h (Glaesmann, 2022).

Jahresnutzungsgrad Der Jahresnutzungsgrad η_a bezeichnet die nutzbare Energie, die ein Kessel aus dem Brennstoff gewinnen kann (Pistohl, 2013). Bei hohen Abstrahlverlusten und eine hohe Taktung sinkt der Jahresnutzungsgrad. Je nach Baujahr und Technologie des Kessels liegt dieser Wert zwischen 0,5 und 0,96. Ölkessel liegen zwischen 0,5 und 0,85. Für Gaskessel sind Werte von 0,7 bei alten Gaskesseln und 0,96 für Gaskessel mit Brennwert-Technologie einzusetzen (Glaesmann, 2022). Diese Werte werden auch überschlagsmäßig von Pistohl bestätigt (Pistohl, 2013).

2.1.3 Berechnung der Heizlast

Für überschlagsmäßige Berechnungen der Heizlast existieren in der Literatur fünf Methodenansätze. Dieses unterteilen sich in Verfahren, welche als Berechnungsgrundlage den Energieverbrauch, den Endenergiebedarf und das Baujahr der Gebäude nutzen. In der Reihenfolge der Berechnungsparameter werden die Verfahren folgend vorgestellt (Glaesmann, 2022):

Energieverbrauch Liegen die jährlichen Verbrauchsdaten über mehrere Jahre (mindestens fünf Jahre) vor, so erfolgt die Berechnung mit Hilfe der Methode der Heizlastberechnung über

Energieverbrauch. Die Berechnung kann auf zwei Arten erfolgen. Allgemein eignet sich diese Methode, wenn keine Dokumente über die Gebäudebausubstanz vorliegen.

In der ersten Berechnungsvariante wird für die Kalkulation der Heizlast neben dem Jahresverbrauch des Energieträgers außerdem ein Divisor benötigt, welcher den Verbrauch des Energieträgers angibt, um 1 kW pro Jahr zu erzeugen. Mit Hilfe von Praxiswerten für Deutschland wird der Divisor aus einer Tabelle abgelesen. Die Heizlast aus der Brennstoffmenge beträgt

$$\Phi_{HL} = \frac{\dot{Q}_{Br}}{Divisor} \quad \text{Formel 1}$$

Die verwendeten Divisoren je nach Energieträger sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 Divisor je nach Energieträger (Glaesmann, 2022, S. 124).

Energieträger	Praxiswerte Deutschland Divisor
Erdgas [m ³]	230 m ³ /(kW · a)
Heizöl [l]	250.230 l/(kW · a)
Flüssiggas [l]	335.230 l/(kW · a)

Für die zweite Variante müssen die verbrauchte Wärmemenge, die Vollbenutzungsstunden und der jährliche Nutzungsgrad des Heizkessels bekannt sein. Dabei ist die jährliche Wärmemenge des Energieträgers entweder der Heizjahresabrechnung zu entnehmen oder mit Formel 3 über den Heizwert zu berechnen. Die Heizlastberechnung über die Jahresvolllaststunden beträgt

Jahresvolllaststunden Diese werden berechnet aus

$$\Phi_{HL} = \frac{\dot{Q}_{HL} \cdot \eta_a}{b_{vH}} \quad \text{Formel 2}$$

Die Wärmemenge des Energieträgers beträgt

$$\dot{Q}_{HL} = \dot{Q}_{Br} \cdot H_i \quad \text{Formel 3}$$

Energieausweis Liegt für die Gebäude ein Energieausweis vor, so kann über den Endenergiewert die Heizlast berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass die ermittelten Verbrauchswerte aktuell sind. Angewendet wird das Verfahren vor allem bei Neubauten. In dieser Methode ist die Heizlast für eine Warmwassererhitzung mit einkalkuliert, wie auch bei den beiden vorherigen Berechnungsmethoden.

$$\Phi_{HL} = \frac{\dot{q}_{HL,E} \cdot A_H}{b_{vH}} \quad \text{Formel 4}$$

Wohnfläche Für Bestandsgebäude erfolgt die Abschätzung der Heizlast in der Literatur häufig über die Wohnfläche und das Baujahr. Für das Baujahr liegen spezifische Heizlastwerte in einer Tabelle vor, getrennt in Baujahr und Dämmungszustände des Gebäudes

$$\Phi_{HL} = A_H \cdot \phi_{HL} \quad \text{Formel 5}$$

Jedoch berücksichtigen die vier vorher beschriebenen Näherungsverfahren nicht die Nomenklatur, dass die Heizlast proportional zu der Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur ist. Unter Anwendung dieser Nomenklatur lassen sich Jahreswärmebedarfe außentemperaturbereinigt mit einander vergleichen. In der Literatur existiert mit dem Heizlastberechnungs-

verfahren nach Hitchin & Hyde [Day, 2006] eine Methode, welche diesen Faktor unter der Nutzung der Gradtage in die Rechnung einbezieht. Die Berechnung der Heizlast erfolgt mit zwei Formeln. Die Heizlast beträgt

$$\Phi_H = HLC \cdot (\vartheta_i - \vartheta_a) \quad \text{Formel 6}$$

und der Wärmeverlustkoeffizient

$$\dot{Q}_{HL} = HLC \cdot GTZ \cdot 24 \quad \text{Formel 7}$$

Bei diesem Verfahren ist zu beachten, dass es sich nur auf die Berechnung der Heizungsleistung ohne Warmwassererwärmung bezieht [Day 2006].

2.2 Auswahlfaktoren von Wärmepumpen

Um die Begriffe in den Datenblättern der Hersteller verstehen und bewerten zu können, werden die wichtigsten Begriffe für eine Auswahl von Wärmepumpen erläutert. Diese sind die Nennleistung, die Nennbetriebspunkttemperatur, die Leistungszahl und die Jahresarbeitszahl.

Nennleistung Die Nennleistung einer Wärmepumpe beschreibt die Leistung, die von der Wärmepumpe dauerhaft und unabhängig von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen abgegeben werden kann [Bendel et al., 2008].

Von den Herstellern werden diese Werte für verschiedene normierte Nennbetriebspunkttemperaturen angegeben, die in der DIN EN 14511-2 definiert sind. Diese Temperaturen gliedern sich in zwei Werte auf. Die zu erreichenden Vorlauftemperatur unter Nennleistung und der Wärmequellentemperatur. Je nach Art der Wärmepumpe können sich die Angaben der Hersteller zu den Vorlauftemperaturen unterscheiden, wobei die Wärmequellentemperaturen für die Wärmepumpenarten auf die Werte $-7\text{ °C} / 0\text{ °C} / +2\text{ °C} / +7\text{ °C}$ und $+10\text{ °C}$ normiert sind. Diese Begriffsdefinitionen sind die Grundlage für die weiteren Begriffe Leistungszahl und Jahresarbeitszahl.

Leistungszahl COP Die Kennziffer Leistungszahl, gibt das Verhältnis von abgegebener Nennleistung zu der aufgenommenen elektrischen Leistung an [Glaesmann, 2022]

$$COP_N = \frac{P_N}{P_{el}} \quad \text{Formel 8}$$

Somit charakterisiert die Leistungszahl die Effizienz der Wärmepumpe. Eine weitere Bezeichnung bei den Herstellern von Wärmepumpe für die Leistungszahl ist der COP-Wert (Coefficient of Performance). Der erste Buchstabe in den Herstellerblättern steht für das Medium der Wärmequelle. Dabei wird zwischen Luft (A = Air), Sole (B = Brine) und Wasser (W = Water) unterschieden. Die Zahl hinter dem ersten Buchstaben bezeichnet die Temperatur der Wärmequelle in einem bestimmten Betriebspunkt. Für Luft-Wärmepumpen sind die Betriebspunkte -7 °C , $+2\text{ °C}$ und $+7\text{ °C}$. Sole-Wärmepumpen werden bei 0 °C angegeben und Wasser-Wärmepumpen bei 10 °C Wärmequellentemperatur. Nach den Angaben erfolgt die Trennung der Wärmequelle zu der Temperatur der Wärmesenke durch einen Spiegelstrich. Die Wärmesenke bezeichnet synonym das Wärmeübertragungsmedium der Wärmenutzungsanlage. Angegeben wird die Wärmesenke durch ein Wärmeträgermedium, meist Wasser (W) und einer Zahl für die Vorlauftemperatur. Als Vorlauftemperaturen wird häufig 35 °C angegeben, es gibt jedoch Hersteller die auch für 55 °C Vorlauftemperatur den COP-Wert angeben – siehe Für detailliertere Informationen siehe auch VDI 4650.

Tabelle 2. Unter Kenntnis dieser Angaben lassen sich Wärmepumpen gleicher Wärmequellen von verschiedenen Herstellern mit einander vergleichen und energetisch bewerten (Glaesmann, 2022).

Die Leistungszahl einer Wärmepumpe ist umso höher, je niedriger die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ist (Ochsner 2009). Aus diesem Grund sollten bei der Wirtschaftlichkeit im Betrieb darauf geachtet werden, dass die Wärmequellentemperatur möglichst hoch und die Vorlauftemperatur in der Heizung möglichst niedrig ist. Somit gibt es zwei Einflussfaktoren, um die Effizienz der Wärmepumpe zu erhöhen. Als Überschlagseinschätzung gilt allgemein, dass bei Reduktion der Vorlauftemperatur um 1 K sich die Leistungszahl um 2,4 % erhöht. Bei Erhöhung der Quelltemperatur um 1 K steigt die Leistungszahl um 2,7 % (Viessmann Werke 2011). Damit es in einer Luft-Wärmepumpe bei tiefen Temperaturen am Verdichter zu keiner Eisbildung kommt, wird der Verdichter mit einer Zusatzheizung oder durch Kreislaufumkehr erwärmt. Je nach Erwärmungsart wird mit der Erwärmung der COP um einen bestimmten Faktor reduziert. Diese Veränderung des COP-Wertes mit den Erwärmungsfaktoren S_{AB} wird nach VDI 4650-1 ermittelt

$$COP_{\dot{N}} = COP_N - S_{AB} \quad \text{Formel 9}$$

Für detailliertere Informationen siehe auch VDI 4650.

Tabelle 2 Nomenklatur für Wärmepumpen

	Buchstabe	Bezeichnung	Zahl	Bezeichnung
1	Medium der Wärmequelle	B = Brine (engl. für Sole)	Temperatur der Wärmequelle	0 = 0 °C
		W = Water (engl. für Wasser)		10 = 10 °C
		A = Air (eng. Für Luft)		2 = 2 °C
/	Trennung durch Spiegelstrich [/]			
2	Medium der Wärmenutzungsanlage	W = Water (engl. für Wasser)	Vorlauftemperatur der Wärmenutzungsanlage	35 = 35 °C
				50 = 50 °C
				55 = 55 °C

SCOP Nach der VDI 4650-1 wird bei Wärmepumpen unterschieden zwischen der berechneten Jahresarbeitszahl, abgekürzt SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) und der gemessenen Jahresarbeitszahl SPF (Seasonal Performance Factor). Der SCOP-Wert beschreibt den Quotienten von der abgegebenen Nutzwärme zu der eingesetzten elektrischen Energie

$$SCOP_{WP} = \frac{\dot{Q}_{WP}}{\dot{Q}_{el}} \quad \text{Formel 10}$$

Beeinflusst wird der SCOP-Wert durch verschiedene Faktoren. Die Nutzwärme und elektrische Energie sind von dem COP-Wert der Wärmepumpe und damit von den Temperaturunterschieden zwischen Wärmequelle und Wärmesenke abhängig. Weitere einwirkende Faktoren sind die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf, sowie des zu überwindenden Höhenpotenzials des Wärmeträgermediums.

Die Berechnung der SCOP-Werte einer Wärmepumpe unterteilen sich nach VDI 4650-1 für die Wärmequelle Luft und Erde in zwei unterschiedliche Kalkulationsformeln. In den Richtlinien der VDI 4650-1 kann der SCOP-Wert für unterschiedliche Vorlauftemperaturen, Temperatur-

spreizungen der Vorlauf- und der Rücklaufstemperatur, sowie Betriebsbedingungen mit verschiedenen Korrekturfaktoren an die realen Bedingungen angepasst werden. Für die Kalkulation der SCOP-Werte bei Sonden, Kollektoren, sowie Grundwasser dient

$$SCOP_{WP} = \frac{COP_N \cdot F_{\Delta T} \cdot F_T}{F_P} \quad \text{Formel 11}$$

Im Unterschied zu Sole-Wärmepumpen ist die Leistung bei Luft-Wärmepumpen von der Außentemperatur abhängig. In den Datenblättern sind drei verschiedene COP-Werte für die definierten Außentemperaturen angegeben. Aus diesen Werten erfolgt die Berechnung des SCOP-Wertes für Luft-Wärmepumpen zu

$$SCOP_{WP} = \frac{F_{\Delta T}}{\frac{F_{T1}}{COP_{N1}} + \frac{F_{T2}}{COP_{N2}} + \frac{F_{T3}}{COP_{N3}}} \quad \text{Formel 12}$$

Mit der Nutzung der Wärmepumpe für die Trinkwasseraufbereitung und der Berücksichtigung der monovalenten/ bivalenten Betriebsweise kann der SCOP-Wert einer Wärmequellenanlage berechnet werden

$$SCOP_{WPA} = \frac{1}{(1-y) \cdot \frac{\alpha}{SCOP_{WP}} + y \cdot \frac{\alpha}{SCOP_{WP}} + 1 - \alpha} \quad \text{Formel 13}$$

Die Betriebsweisen und der Deckungsgradfaktor α werden im nächsten Kapitel 2.3 ausführlich vorgestellt.

Jahresarbeitszahl Äquivalent zu dem Quotienten des SCOP-Wertes nach Formel 10 wird der SFP-Wert berechnet

$$SFP = \frac{\dot{Q}_{WP,g}}{\dot{Q}_{el,g}} \quad \text{Formel 14}$$

Die Werte der Quotienten des SFP können jedoch nur durch Messungen der Wärmemenge, bzw. der aufgenommenen Energiemenge in einem Betriebsjahr der Wärmepumpe ermittelt werden. Da die Einflussfaktoren auf die Leistung der Wärmepumpe im Betrieb vielfältiger sind, als bei den Bedingungen der berechneten Jahresarbeitszahl, existieren große Abweichungen zwischen SPF und SCOP.

2.3 Betriebsarten von Wärmepumpen

Innerhalb dieses Kapitels werden zuerst die Begriffe Dimensionierungspunkt und Deckungsgrad vorgestellt, welche für den bivalenten Betrieb relevant sind. Anschließend wird die monovalente und monoenergetische Betriebsweise erläutert. Vor der Beschreibung der bivalenten Betriebsarten wird die Leistungsregelung einer Wärmepumpe und die verwendeten Kältemittel vorgestellt. Diese Angaben werden sowohl für die technische Auswahl, als auch für die Wirtschaftlichkeitsberechnung benötigt. Zum Schluss werden die unterschiedlichen bivalenten Betriebsweisen definiert und auf die Methoden zur Ermittlung des Bivalenzpunktes eingegangen.

Für Wärmepumpe existieren zwei verschiedene Hauptbetriebsweisen. Diese unterteilen sich in die monovalente und in die bivalente Betriebsweise. Die Auswahl und Auslegung der Betriebsweisen hängen von der benötigten Wärmemenge und weiteren Faktoren ab. Soll die Wärmepumpe sowohl für das Heizungswasser, als auch für das Warmwasser genutzt werden, so werden sich höhere Vorlauftemperaturen ergeben, als bei der reinen Bereitstellung von

Heizwasser. Je nach Betriebsweise ergeben sich zudem unterschiedliche benötigte Heizlasten. Weitere zu beachtende Faktoren sind die möglichen Wärmequellen und der bauliche Zustand des Objektes (Tiator & Schenker, 2013b).

Bei der Auswahl des Betriebspunktes sind die Faktoren Dimensionierungspunkt und Deckungsgrad entscheidend:

- Unter dem Dimensionierungspunkt versteht man „*die niedrigste Außentemperatur, bei der die Wärmepumpe die gesamte benötigte Heizwärmemenge liefern kann*“ (Tiator & Schenker, 2013b, S. 98).
- Der Deckungsgrad α beschreibt den prozentualen Anteil einer Wärmepumpe an der gesamten Jahreswärmemenge (Tiator & Schenker, 2013b). Dieser Wert kann entweder durch Literaturangaben abgeschätzt oder über die VDI 4650 berechnet werden. Ermittelt wird der Deckungsgrad über den Leistungsanteil der Wärmepumpe an der Gesamtheizlast bei Norm-Außentemperatur. Der Leistungsanteil wird berechnet, indem der prozentuale Anteil der Wärmepumpen-leistung von der Gesamtheizlast bei Norm-Außentemperatur gebildet wird (Jagnow et al., 2023).

Mit dem Dimensionierungspunkt und dem Deckungsgrad kann die für das Gebäude optimale Wärmepumpe und Wärmequelle ermittelt werden (Tiator & Schenker, 2013b).

In der bivalenten Betriebsweise mit zwei Wärmeerzeugern (s.u.) dient der Dimensionierungspunkt häufig als Abgrenzung der Grundlast von der Spitzenlast im Jahresdauer-Liniendiagramm. In dem Jahresdauer-Liniendiagramm ist die benötigte Leistung gegen die akkumulierten Jahresstunden aufgetragen. Die Grundlast wird durch eine nahezu konstante Leistung bei hohen Jahresbetriebsstunden definiert. Spitzenlasten weisen hohe Leistungsschwankungen und geringe Jahresbetriebsstunden auf. In der Auslegung werden die Grundlasten von der Wärmepumpe und die Spitzenlasten durch Gaskessel oder Heizstäbe geliefert (Dötsch et al., 1998). Beispielfhaft ist dies in Abbildung 4 zu sehen.

2.3.1 Monovalente Betriebsweise

In der monovalenten Betriebsart leistet die Wärmepumpe den gesamten Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser für ein Gebäude (Glaesmann, 2022). Das Gebäude sollte für einen optimalen Betrieb der Wärmepumpe einen geringen Wärmebedarf und niedrige Vorlauftemperaturen ausweisen. Somit wird diese Betriebsweise vor allem in Neubauten eingesetzt. In Altbauten substituieren die Wärmepumpen die vorhandenen Heizungskessel. Mit bestimmten Kältemitteln ist es grundsätzlich möglich Maximaltemperaturen von bis zu 70 °C oder mehr bereitzustellen (Tiator & Schenker, 2013b). Die durchgehende Nutzung der Wärmepumpe stellt einige Anforderungen an die verbundene Wärmequelle. Diese muss das ganze Jahr konstant, hohe Temperaturen liefern, um bei Norm-Außentemperatur den Wärmebedarf liefern zu können (Pistohl, 2013). Diese Betriebsart eignet sich vor allem für Sole-Wärmepumpen und Wasser-Wärmepumpen. Für Luft-Wärmepumpen, deren Leistung von saisonalen Temperaturschwankungen abhängen, ist die Betriebsart unwirtschaftlich. Dies hängt jedoch von der Klimaregion ab (Glaesmann, 2022). Der Deckungsgrad beträgt 100 % (Tiator & Schenker, 2013b).

Monoenergetische Betriebsweise Eine Unterart des monovalenten Betriebs ist die monoenergetische Betriebsweise. Bei sehr kalten Temperaturen und einer hohen Spitzenlast wird in der Wärmepumpe ein elektrischer Heizstab zur Unterstützung der Wärmeleistung eingeschaltet. Der Vorteil dieser Zuschaltung ist, dass die Wärmepumpe kleiner ausgelegt werden kann, bezüglich der Heizlast (Tiator & Schenker, 2013b). Nach einer Studie des Fraunhofer-Instituts spielte bei den dort betrachteten Luft-Wärmepumpen der Betrieb des Heizstabs nur

eine untergeordnete Rolle. Die Heizstäbe leisteten bei den betrachteten Wärmepumpen 1,9 % der Jahresheizwärme. Neben der Erhitzung des Heizwassers bei kalten Temperaturen, dient der Heizstab als Wärmequellen-Ersatz bei technischen Ausfällen der Wärmepumpe (Günther et al., 2020). Andere Quellen geben einen theoretischen Deckungsgrad von 95 % an (Tiator & Schenker, 2013b).

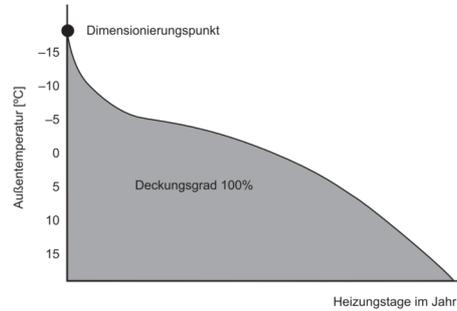


Abbildung 1 Monovalente Betriebsweise einer Wärmepumpe (Tiator & Schenker 2013b, S. 99)

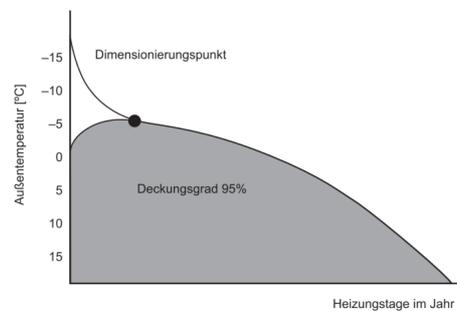


Abbildung 2 Monoenergetische Betriebsweise einer Wärmepumpe (Tiator & Schenker 2013b, S. 100)

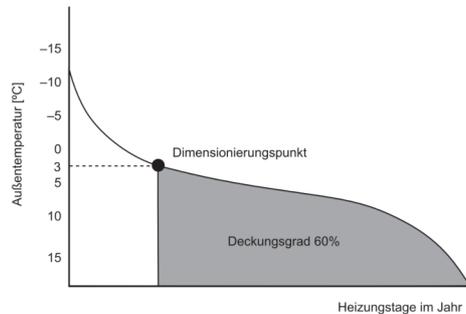


Abbildung 3 Bivalent-alternative Betriebsweise einer Wärmepumpe (Tiator & Schenker 2013b, S. 103)

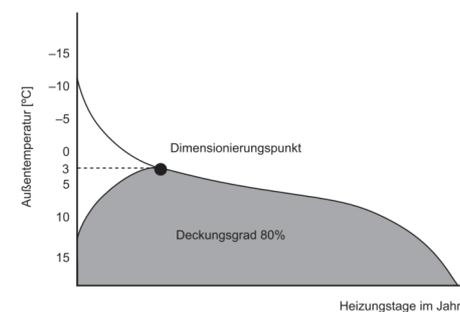


Abbildung 4 Bivalent-parallele Betriebsweise einer Wärmepumpe (Tiator & Schenker 2013b, S. 102)

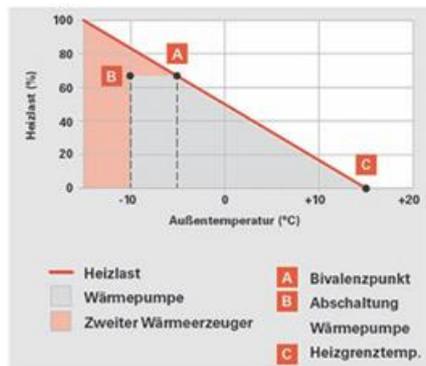


Abbildung 5 Bivalent-teilparallele Betriebsart einer Wärmepumpe (Glaesmann, 2022, S. 110)

2.3.2 Bivalente Betriebsweise

Die zweite Hauptbetriebsart ist die bivalente Betriebsweise. Hierbei leistet die Wärmepumpe nicht die gesamte Wärmeleistung, sondern nur einen Teil. Der andere Anteil wird durch einen anderen Wärmeerzeuger, wie ein Gas- oder Ölkessel bereitgestellt (Tiator & Schenker 2013b). Gerade in Altbauten eignet sich diese Betriebsart, da Öl- oder Gaskessel bereits eingebaut sind. Damit ergeben sich Dimensionierungspunkte an welchen der Wärmeerzeuger hinzu oder abgeschaltet wird, je nachdem wie die Wärmepumpe bivalent betrieben wird.

Es wird zwischen Fixed-Speed und leistungsgeregelten Wärmeerzeugern unterschieden. Bei Überschreitung der Vorlauftemperatur schaltet sich die Wärmepumpe ab, bei einer Unterschreitung schaltet die Wärmepumpe zu und heizt die Vorlauftemperatur wieder auf den Soll-Wert. Dabei läuft der Verdichter entweder im Volllastbetrieb oder ist ausgeschaltet (Glaesmann, 2022). Luft-Wärmepumpen mit hohen Wärmequellen-Temperaturschwankungen werden häufig ein- und ausgeschaltet, was auch als Takten bezeichnet wird. Zur Vermeidung dieser Taktung werden die Verdichter leistungsgeregelt geschaltet und an die Umgebungstemperatur angepasst. Somit wird die Temperatur und der Druck des Kältemittels je nach benötigter Vorlauftemperatur verändert (Viessmann Werke, 2011). Eine Leistungsregelung wird mit Hilfe der Invertertechnologie durchgeführt. Über die Transformation von Wechselspannung zu Gleichspannung kann die Frequenz des Verdichterdrehfeldes gesteuert werden und damit die Drehzahl des Verdichters (Viessmann Werke, 2011).

Bei der bivalenten Betriebsweise wird zwischen dem bivalent-alternativen-, der bivalent-parallelen- und der bivalent-teilparallelen Betriebsart unterschieden.

Bivalent-alternative Betriebsart In der bivalent-alternativen Betriebsart stellt die Wärmepumpe bis zu einem eingestellten Abschaltzeitpunkt die erforderliche Wärmemenge bereit. Wird der Abschaltzeitpunkt unterschritten schaltet die Wärmepumpe ab und die zweite Wärmequelle (z.B. der Gaskessel) übernimmt den Heizbetrieb allein. Angewendet wird diese Schaltung bei Häusern mit hohen Vorlauftemperaturen, welche die Wärmepumpe nicht bereitstellen kann (Glaesmann 2022). Der Deckungsgrad beträgt zwischen 60 % und 70 % (Tiator & Schenker 2013b).

Bivalent-parallele Betriebsweise Der bivalent-parallele Betrieb zeichnet sich dadurch aus, dass die Wärmepumpe bis zum Bivalenzpunkt die Wärmemenge leistet. Unterhalb dieses Punktes wird die Wärmepumpe nicht abgeschaltet, sondern läuft parallel zu einem zweiten hinzugeschalteten Wärmeerzeuger. Es ergeben sich höhere Anteile der Wärmepumpe an dem Jahresheizbedarf, als bei der bivalent-alternativen-Darstellung (Glaesmann 2022). Dieser Deckungsgradanteil kann bei bis zu 80 % liegen (Tiator & Schenker 2013b). Angewendet wird die

Betriebsart, wenn die dauerhaft bereitstellbare Wärmepumpen-Vorlauftemperatur nicht höher liegt, als die benötigte Vorlauftemperatur (Glaesmann, 2022).

Bivalent-teilparallele Betriebsweise Bivalent-teilparallele Zusammenschaltungen sind eine Kombination aus Bivalent-Alternativer und Bivalent-Paralleler Schaltung. Wird ein bestimmter Dimensionierungspunkt unterschritten, so wird ein zweiter Wärmeerzeuger parallel zu der Wärmepumpe hinzugeschaltet. Ab einem zweiten Dimensionierungspunkt, der tiefer als der erste Punkt liegt, schaltet die Wärmepumpe ab und der andere Wärmeerzeuger übernimmt sowohl Grund- als auch Spitzenlast (Glaesmann, 2022). Ausgehend von den Bivalent-Alternativen und der Bivalent-Parallelen Schaltung liegt der Deckungsgrad zwischen 60 % und 80 %. Nach Pistohl et. al. (2013) liegt der Deckungsgrad bei ca. 75 %.

Bivalenzpunkt In der bivalenten Auslegung ist das Ziel die Ermittlung des Bivalenzpunktes und damit der nötigen Heizlast in diesem Punkt. Für die Auslegung existiert in der Literatur eine graphische und eine rechnerische Variante.

Bei der graphischen Variante wird bei vorliegender Leistungskurve der Wärmepumpe der Schnittpunkt zwischen Gebäudeheizlastkennlinie und der Leistungskurve der Wärmepumpe ermittelt (Glaesmann, 2022). Bei hohen Vorlauftemperaturen der Heizung über 55 °C wird der Bivalenzpunkt durch die Vorlauftemperatur vorgegeben. Für den Umschaltpunkt wird die Vor- und die Rücklauftemperatur als lineare Geraden über die Außentemperatur aufgetragen. Anschließend wird bei der zu leistenden Vorlauftemperatur der Wärmepumpe eine vertikale Linie auf die Temperaturachse gezeichnet. Der Schnittpunkt der Gerade mit der Vorlauftemperatur bestimmt die Lage des Bivalenzpunktes. Der X-Wert des Schnittpunktes gibt die Temperatur an, bei welcher der zweite Wärmeerzeuger angeschaltet wird. Bei Einzeichnung dieser Temperatur in das Diagramm mit der Gebäudeheizleistung ergibt sich die benötigte Leistung der Wärmepumpe bei dieser Außentemperatur.

Aus dieser Leistung kann aus den Programmen der Hersteller eine Wärmepumpe ausgewählt werden. Unterhalb der Temperatur des Bivalenzpunktes ist die Heizleistung der Wärmepumpe zu gering, um die Gebäudeheizlast vollständig zu decken. Es kann ein vorhandener Heizkessel zur Leistung der nötigen Vorlauftemperatur und Heizlast genutzt werden (Ochsner, 2009).

Eine rechnerische Auslegung der Wärmepumpe -Leistung im Bivalenzpunkt erfolgt nach VDI 4645. Die Heizlast im Bivalenzpunkt beträgt dann

$$\Phi_{HL,B} = \Phi_{HL} \cdot \frac{\vartheta_{HG} - \vartheta_B}{\vartheta_{HG} - \vartheta_a} \quad \text{Formel 15}$$

2.4 Geologie und Hydrologie

Geologische und hydrologische Kenntnisse werden zur Auslegung von Sole-Wärmepumpen, Wasser-Wärmepumpen, respektive Kollektoren, Sonden und Grundwasserbrunnen benötigt. Im Folgenden wird auf relevante zu beachtende Faktoren der Böden und des Grundwassers hinsichtlich der Wärmequellenanalyse eingegangen.

Die Geologie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, welche die Entstehung von Gesteinen und fossilen Lebewesen unter der Beachtung der chemischen und physikalischen Gesetze erforscht. Eine Teildisziplin dieser Wissenschaft ist die Bodenkunde. In der Bodenkunde wird die Dynamik der Bodenbildung untersucht (Bahlburg & Breitzkreuz, 2017). Böden sind entweder aus mineralischen, organischen oder einer Kombination aus beiden Bestandteilen aufgebaut. Mineralische Böden bestehen aus einer oder verschiedenen Mineralienarten. Je nach chemischer Zusammensetzung weisen die Mineralien unterschiedliche geometrische Formen und

Korngrößen auf. Deren Zusammensetzung und Geometrie verändern sich durch Umwelteinflüsse. Diesen natürlichen Prozess des mechanischen Zerfalls, bezeichnet man als Verwitterung. Es bilden sich sogenannte Gesteinsfragmente mit unterschiedlichen Korngrößen, welche nach der DIN 4023 in unterschiedliche Bodenarten eingeteilt werden. Es wird unter anderem in die Korngrößen Kies, Sand und Ton unterschieden (Dachroth, 2017).

Organische Böden beinhalten nur lebende Organismen, wie Wurzeln, Pflanzenreste oder Mikroorganismen. Eingeteilt werden die organischen Böden nach der DIN EN ISO 14688-2. Am weitesten verbreitet sind Torfarten als organische Bodenform. Diese entstehen durch Zersetzung von Pflanzenresten und Tieren. Neben der reinen Trennung zwischen mineralischen und organischen Bodenarten, existieren zudem Mischarten beider Bodenformen. Befinden sich innerhalb der organischen Böden verschiedenen Mineralienarten und Gesteinsgrößen, so wird diese Bodenart als organogene Boden definiert (Dachroth, 2017). Für die Potenzialbewertung von Böden und Gesteinen als geothermische Wärmequelle ist unter anderem die physikalische Größe der Wärmeleitfähigkeit wichtig. Die Wärmeleitfähigkeit κ beschreibt die Menge an Wärme pro Zeiteinheit, welche über eine räumliche Distanz und einen Temperaturunterschied transportiert wird. Während Metalle hohe Wärmeleitwerte aufweisen, sind die Werte in Gesteinen gering. Höhere durchschnittliche Leitwerte erreichen Gesteinsarten mit hoher Porosität und zirkulierendem Wasser in den Porenräumen (Bauer et al., 2018).

Eine weitere Teildisziplin der Geologie ist die Hydrogeologie. Die Hydrologie analysiert die Eigenschaften von Wasser und die Wechselwirkungen mit Böden- und Gesteinsarten (Hölting & Coldewey, 2013). Die verfügbare Grundwassermenge im Boden ist abhängig von der Durchlässigkeit der Bodenschichten, sowie dem Fassungsvermögen von Poren in den jeweiligen Schichten. Mit Hilfe dieser beiden Faktoren unterscheidet man zwei Arten Gesteinsarten: Die Grundwasserleiter und die Grundwassernichtleiter (Bahlburg & Breitzkreuz, 2017).

Grundwasserleiter weisen eine hohe Durchlässigkeit und Porosität auf, sodass versickertes Oberflächenwasser aufgenommen und innerhalb des Leiters weiter transportiert werden kann. Gesteinsarten mit diesen Eigenschaften sind Kiese und Sande. Gesteine mit hohem Tonanteil und geringer Durchlässigkeit sind sogenannte Grundwassernichtleiter. Innerhalb der Bodenschichten können sich Grundwasser- und Grundwassernichtleiter abwechseln. Es bilden sich sogenannte Grundwasserstockwerke (Bahlburg & Breitzkreuz, 2017).

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Grundwassers werden durch die Art und Menge der im Grundwasserleiters befindlichen Stoffe bestimmt. Abhängig sind die Eigenschaften von der chemischen Zusammensetzung und den Wechselwirkungen des Oberflächenwassers mit den verschiedenen Bodenschichten über dem Grundwasserleiter. Die Inhaltstoffe im Grundwasser werden in gelöste und ungelöste, sogenannte partikuläre Stoffe unterschieden. Gelöste Inhaltstoffe sind hauptsächlich Ionen und Gase. Die wichtigsten Ionen sind Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium, Eisen, Mangan, sowie Nitrat und Hydrogenkarbonat. Bei den Gasen sind es Sauerstoff, Stickstoff und Methan. Die partikulären Anteile sind je nach Porosität der Bodenschichten im Grundwasser vorhanden. In Porengrundwasserleiter werden partikuläre Stoffe durch oberhalb liegender Schichten gefiltert und gelangen nicht in den Grundwasserleiter (Wisotzky et al., 2018).

Wie hoch der Anteil des Stoffs im Grundwasser ist (Konzentration), hängt von der Löslichkeit des Stoffs ab. Die Löslichkeit bezeichnet „*die maximale Menge eines Stoffes, die unter festgelegten Bedingungen (Temperatur und Druck) von einer bestimmten Menge Wasser (allgemein: Lösungsmittel) gelöst werden kann*“ (Wisotzky et al., 2018, S. 6). In der Literatur existieren verschiedene Einheiten zu Beschreibung der Löslichkeit, welche mit der Dichte ρ und der Molmasse M ineinander umgerechnet werden können (Wisotzky et al., 2018).

Die Löslichkeit von Mineralien im Grundwasser wird durch den pH-Wert beeinflusst. Auf der anderen Seite ist der pH-Wert durch die Mineralien im Grundwasser veränderbar. Dieser chemische Wert dient für die Grundwasseranalyse und gibt Aufschluss über die Konzentration eines Minerals im Grundwasser. Mit zunehmender Grundwassertemperatur verringert sich der pH-Wert (Wisotzky et al., 2018).

2.5 Wärmequellen

In diesem Kapitel wird zuerst der Begriff der oberflächennahen Geothermie und des Wärmenetzes definiert und abgegrenzt. Anschließend werden in den folgenden Unterkapiteln die verschiedenen Wärmequellen für die Versorgung von Wärmepumpen charakterisiert. Die Charakterisierung besteht aus der Beschreibung der Wärmequelle und Aufzeigen von Berechnungen für die zukünftige Auslegung.

Wie in dem vorherigen Kapitel Auswahl Faktoren beschrieben wurde, hängt die Effizienz einer Wärmepumpe hauptsächlich von der Temperatur der Wärmequelle ab. Neben der Nutzung der Außenluft, bietet die oberflächennahe Geothermie ein weiteres Wärmequellenpotenzial, da die Temperatur um ca. 3 °C je 100 m Tiefe zunimmt. Der Begriff der Oberflächennahen Geothermie wird ab einer Tiefe von ca. 400 m oder einer Temperatur von 20 °C von der tiefen Geothermie abgegrenzt. Oberflächennahe Geothermie wird durch die Systeme Erdkollektoren, Sonden und Grundwasserbrunnen nutzbar (Stober & Bucher, 2012). In der Literatur wird zwischen den geschlossenen Kreisläufen, wie Kollektoren und Sonden, und den offenen Kreisläufen, wie Grundwasser unterschieden (Hartmann, 2006).

Die Nutzung von Wärme aus Oberflächennaher Geothermie ist vor allem von den geologischen Strukturen am Standort abhängig. Um die Wärme von der Wärmequelle zu den Abnehmern zu transportieren, werden verschiedene Arten von Wärmenetze eingesetzt. Es wird zwischen Nah- und Fernwärmenetzen unterschieden. Nahwärmenetze sind durch eine geringe räumliche Ausdehnung und geringen Vorlauftemperaturen bis 60 °C charakterisiert (Hagedorn 2019). Fernwärmenetze weisen hohe Vorlauftemperaturen zwischen 70 °C und 130 °C auf (Konstantin & Konstantin, 2022). Außerdem kann sich die Ausdehnung auf mehrere Stadtteile erstrecken, wobei Nahwärmenetze eher lokal für mehrere Gebäude konzipiert sind (Hagedorn, 2019).

2.5.1 Außenluft

Die am einfachsten zu nutzende Wärmequelle ist die Außenluft, da Luft an jedem Ort der Welt unbegrenzt zur Verfügung steht. Wegen der geringen spezifischen Wärmekapazität der Luft im Vergleich zu Wasser müssen für die gleiche übertragende Wärmemenge größere Luftmengen bewegt werden, als bei der Nutzung von oberflächennaher Geothermie. Bei Luft-Wärmepumpen dient die Außenluft als Wärmequelle. Mit Ventilatoren wird die Umgebungsluft angesaugt und in einem Wärmetauscher abgekühlt. Die aufgenommene Wärme dient zur Erhitzung des Heizungswassers. Nach der Abkühlung im Wärmetauscher wird die kalte Luft über einen Abluftkanal wieder der Umgebung zugeführt (Glaesmann, 2022). Dieser Vorgang wird als aerodynamische Energiegewinnung definiert (Bonin, 2018). Im Gegensatz zu den in den folgenden Kapiteln beschriebenen Wärmequellen unterliegt die Lufttemperatur saisonalen Schwankungen. Im Winter weist die Luft als Wärmequelle geringe Temperaturen auf. Dies ist insbesondere wegen des hohen Wärmebedarfs der Gebäude von Bedeutung.

Somit ist die Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Senke hoch und es ergeben sich schlechte Leistungszahlen der Luft-Wärmepumpe. Deshalb ist eine monovalente Betriebsweise in Altbauten mit hohen Vorlauftemperaturen nicht wirtschaftlich. Ein Lösungsansatz ist

die Verwendung eines elektrischen Heizstabes als Unterstützung oder die bivalente Betriebsweise (Glaesmann, 2022). Eine weitere Herausforderung besteht in dem Wasserdampf, welcher in feuchter Luft enthalten ist. Je kälter die Lufttemperatur, desto weniger Wasserdampf kann diese aufnehmen. Wird die Luft im Wärmetauscher der Luft-Wärmepumpe weiter abgekühlt, so wird Wasserdampf in Form von Wasser abgegeben. Bei der Abkühlung unter 0 °C setzen sich die Wassertropfen auf den Wärmeübertrager und erstarren zu Eis. Durch die Vereisung wird die Wärmeübertragung beeinträchtigt, wodurch es zum Ausfall kommen kann. Für eine dauerhafte Nutzung ohne Vereisung bei tiefen Temperaturen werden die Wärmeübertrager mit verschiedenen Systemen (Kapitel 2.2) zwischenzeitlich beheizt und abgetaut (Tiator & Schenker, 2013a).

Eine Luft-Wärmepumpe kann sowohl als Split-Gerät, als auch als Monoblockeinheit installiert werden. Der Unterschied zwischen den beiden Bauformen ist, dass im Split-Gerät Verdampfer (Wärmeübertrager der Außenluft) und Wärmepumpe getrennt voneinander aufgestellt werden können. Bei beiden Gerätearten wird zudem unterschieden zwischen der Innen- und der Außenaufstellung (Bonin, 2018). Monoblockanlagen im Keller des Hauses aufzustellen ist wegen der geringen Rohrleitungslängen zu der Heizungsanlage sinnvoll. Die Außenluft wird über Luftkanäle der Wärmepumpe zu- und abgeführt. Es können auch Lüftungsschächte genutzt werden, wenn diese ausreichend für die Luftmengen dimensioniert sind (Pistohl, 2013). Die Luftkanäle müssen einen ausreichenden Abstand zu einander aufweisen, um keinen thermischen Kurzschluss zu verursachen, d.h. kalte Luft wird erneut von der Wärmepumpe angesaugt (Glaesmann, 2022). Eine Außenaufstellung ist dann sinnvoll, wenn die verfügbare Stellfläche im Keller zu gering oder die Zugänge zum Keller für die Abmessungen der Wärmepumpe nicht ausreichend dimensioniert sind. Im Gegensatz zu einer Innenaufstellung ist die Außenaufstellung weniger komplex, da es keine Anpassungen an die Bausubstanz des Gebäudes, wie die Lüftungsschächte, gibt. Der Aufstellungsort der Monoblock-Wärmepumpe soll nah an Heizungsanlage liegen. Somit werden Wärmeverluste bei der Übertragung in den Heizungsraum minimiert (Pistohl, 2013).

In der Außen-Split-Aufstellung steht nur der Verdampfer mit Ventilator auf einem Fundament außerhalb des Heizungsraums. Gegenüber der Monoblockaufstellung im Außenbereich werden die Übertragungsverluste an die Heizungszentrale verringert, da nur eine Kältemittelleitung von dem Verdichter zum Kompressor der Wärmepumpe verlegt wird. Es wird nur das Kältemittel und keine Heizwärme transportiert. Wird die Verdampfer-Einheit innerhalb des Gebäudes platziert, so bezeichnet man es als Innenaufstellung. Ventilator und Verdampfer können sowohl auf den Dachboden, als auch im Keller aufgestellt werden. Gerade bei Gebäuden mit wenig Kellerfläche kann diese Aufstellungsart eine Option darstellen. Die Kälteleitungen zur Verbindung von Wärmepumpe und Verdampfer können innerhalb des Hauses oder an der Hausfassade verlegt werden. Bei einer Fassadenverlegung gelten die gleichen Vorteile, wie bei der Außen-Split-Aufstellung (Pistohl, 2013).

2.5.2 Erdwärmekollektoren

In diesem Kapitel werden zuerst die Grundlagen und Arten der Erdkollektoren erläutert. Dazu wird im speziellen auf den Aufbau der Systeme eingegangen, verschiedene Bauarten unterschieden und auslegungsrelevante Sachverhalte dargelegt.

Die kostengünstigste Art in der Erschließung geothermischer Wärmequellen stellen Erdkollektoren dar. In dieser Variante wird ein Rohrsystem, bestehend aus Kollektorrohren in den Boden eingebracht. Innerhalb des Rohrsystems wird eine Sole (Mischung aus Wasser und Glycol) gepumpt, welche als Wärmeübertragungsmedium von der Erde zu der Wärmepumpe

dient. Die zirkulierende Sole entzieht dem umliegenden Erdreich Wärme. Je nach Bodenart unterscheidet sich die mögliche Entzugswärmemenge (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010). Für eine dauerhafte Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle ist die saisonale Regeneration der oberen Erdschicht notwendig (Bauer et al., 2018). Die Regeneration erfolgt durch Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten. Eine zusätzliche Nutzung der Wärmepumpe als Kühlung im Sommer kann die Regeneration beschleunigen (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010).

Bei Erdkollektoren wird zwischen horizontaler und vertikaler Bauweise unterschieden. Der horizontalen Bauweise sind die Flachkollektoren zuzuordnen. Die Klasse der vertikalen Erdkollektoren beinhaltet die Graben-Kollektoren und die Spiralkollektoren. Alle diese genannten Kollektorarten bestehen aus Werkstoffen wie Polyethylen, Polypropylen oder Polybutylen, siehe VDI 4640-2. Diese Polymere sind für die benötigten Temperaturintervalle und Drücke in den Leitungen bei einer hohen Lebensdauer geeignet (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010).

In der horizontalen Bauweise werden die Rohre in mäanderförmigen Schleifen mit einem Abstand zwischen 0,5 m und 0,8 m zu einander verlegt (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010). Die Rohrdurchmesser unterscheiden sich abhängig vom Volumenstrom der Sole, der für die Wärmeübertragung nötig ist. Horizontale Kollektoren werden in einer Tiefe von bis zu 2 m verlegt. Innerhalb dieser Tiefe sind die mittljährlichen Durchschnittstemperaturen sicher oberhalb von Frost. Somit wird ein Einfrieren der Sole in den Rohren verhindert. Je nach Region unterscheiden sich die Tiefen, in welchen sicher kein Frost vorliegt (Tiator & Schenker, 2013a).

Die vertikale Bauweise von Flächenkollektoren stellt eine Möglichkeit dar die benötigte Grundfläche zu verringern. Gegenüber dem Flächenkollektor sind in einem Grabenkollektor die Rohre als Spiralen innerhalb eines Grabens verlegt (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010). Durch die spiralförmige Anordnung vergrößert sich die Wärmeübertragungsfläche bei geringerer Grabenfläche (Tiator & Schenker, 2013a).. Bei dieser Bauweise können gleiche Entzugsleistungen mit weniger Erdhubarbeiten erreicht werden. Grabenkollektoren weisen standardmäßig eine Tiefe von ca. 3 m auf, bei einer Breite von ca. 2,5 m. Eine weitere Bauform mit größeren Einbringungstiefen als die Grabenkollektoren und geringerem Flächenverbrauch sind die Spiralkollektoren, die auch als Erdwärmekörbe bezeichnet werden. Diese bestehen aus spiralförmigen Rohrleitungen, welche bis zu 10 m in die Tiefe reichen. Die Breite variiert zwischen 0,5 m und 2 m (Pistohl, 2013). Die Planung und Auslegung von geothermischen Anlagen erfolgt nach VDI 4640-1.

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Leistung der Kollektoranlagen sind die Einbringtiefe, der Kollektorabstand, der Durchmesser der Kollektorrohre, sowie die Bodenverhältnisse am Verlege-Standort in der Region (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010).

Die Abstände der Kollektorrohre haben einen hohen Einfluss auf die Energieeffizienz der Anlage. Je größer der Abstand der Rohre zueinander, desto geringer ist die wärmeübertragende Oberfläche pro Kollektorfläche. Um einen gleichbleibenden Wärmestrom zu bekommen, muss somit der Solemassenstrom erhöht werden. Ein größerer Massenstrom bedeutet eine höhere Pumpenleistung und damit eine geringere Effizienz des Wärmesystems (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010).

Der Durchmesser der Kollektorrohre hängt von der Anlagengröße und damit von dem Massenstrom der Sole ab. Nach Ramming ist die Wahl des Durchmessers zudem von der spezifischen Entzugsleistung des Bodens abhängig. Bei hohen spezifischen Entzugsleistungen sind

unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit große Durchmesser zu wählen (32 mm). Für kleinere Entzugsleistungen können Rohrdurchmesser von 20 mm verwenden (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010).

Den größten Einfluss auf die Auslegung haben die geologischen Bodenverhältnisse, die die spezifische Entzugsleistung festlegen. Für eine erste Abschätzung der Entzugsleistung existieren Näherungswerte in der VDI 4640 Blatt 2. Diese unterteilen sich in die Klimazonen in Deutschland und Gesteinsarten. Die Gesteinsarten sind aufgeteilt in Sand, Lehm, Schluff und sandiger Ton. Zudem werden in den Tabellen für jede Gesteinsart die Entzugsleistung und die jährliche mögliche Entzugsenergie angegeben. Diese dienen für eine erste Abschätzung der benötigten Anzahl an Erdkollektoren. Für die Ermittlung der Anzahl an Erdkollektoren wird im ersten Schritt mit der Entzugsleistung des Bodens die nötige Kollektorfläche berechnet (Glaesmann, 2022)

$$A_K = \frac{\Phi_{HL}}{p_{E,K}} \quad \text{Formel 16}$$

Im zweiten Schritt wird unter der Nutzung des Verlegungsabstandes d der Rohre die Gesamtlänge $L_{K,ges}$ der Rohre ermittelt. Mit einer definierten Länge pro Kollektorkreislauf l_K , kann aus der Gesamtlänge die Anzahl n_K an Kreisläufen berechnet werden (Glaesmann, 2022). Die benötigte Gesamtlänge an Kollektorrohren beträgt

$$L_{K,ges} = \frac{A_K}{d} \quad \text{Formel 17}$$

Damit folgt die Zahl an Kollektorkreisen

$$n_K = \frac{L_{K,ges}}{l_K} \quad \text{Formel 18}$$

2.5.3 Erdwärmesonden

Äquivalent zu dem vorherigen Abschnitt werden zuerst die Grundlagen und verschiedenen Arten der Erdwärmesonden erläutert. In diesem Abschnitt wird außerdem auf den Aufbau der Systeme eingegangen, verschiedene Bauarten erläutert und auslegungsrelevante Vorgaben dargelegt.

Neben den vertikalen Erdkollektoren innerhalb der oberflächennahen Geothermie existieren die Erdwärmesonden, welche synonym als Geothermie-Sonden bezeichnet werden. Erdwärmesonden-Rohre sind hauptsächlich aus Polymer-Werkstoffen hergestellt, die vertikal in Erdbohrungen eingebracht werden. In der mitteltiefen Geothermie und tiefen Geothermie werden für eine höhere Belastbarkeit Stahlrohre eingesetzt (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010). In den Rohren zirkuliert ein Sole-Wasser-Gemisch, welches den umliegenden Gesteinsschichten Wärme entzieht. Die nötige Einbautiefe der Rohre hängt von der benötigten Wärmeleistung der Gebäude und der verfügbaren Fläche für die einzelnen Sonden ab. Bei Ein- bis Zweifamilienhäuser reichen nach Glaesmann (2022) für die Deckung durchschnittlicher Wärmeverbräuche bis zu zwei Erdsonden mit maximal 100 m Bohrtiefe. Ab einer Bohrtiefe von 100 m gilt die Bergbauverordnung und unterliegt damit der Genehmigung und Kontrolle durch die Landesbergaufsicht (Rumohr et al., 2017). Wegen der möglichen Variation der Bohrtiefe, ist diese Art der Wärmequelle bei räumlich begrenzten Grundstücken innerhalb der Stadt eine Möglichkeit für die Erschließung einer Wärmequelle (Pistohl, 2013).

Bei den Erdwärmesonden existieren verschiedene Ausführungen. Dabei wird zwischen der Doppel-U-Erdwärmesonde, der Einfach-U-Erdwärmesonde und der Koaxial-Sonde unter-

schieden (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010). Alle Bauarten bestehen aus einem Vorlauf- und einem Rücklaufrohr für die Zirkulation der Sole (Pistohl, 2013). Ein weiterer Bestandteil einer Erdsonde ist der Sondenfuß. Dieser dient zur Stabilisierung der Sondenrohre, sodass die Reibungsverluste der Wärmeträgerflüssigkeit verringert wird (Bauer et al., 2018).

Die Doppel-U-Erdwärmesonden sind die am häufigsten verbaute Art der Erdwärmesonden. Das Wärmeträgermedium fließt parallel in zwei getrennten Rohren in die Erde und steigt vom Sondenfuß in dem U-förmigen Rohr durch eine Pumpe an die Oberfläche (Bauer et al. 2018). Da die beiden Rohre in derselben Bohrung liegen, beeinflussen sich die Rohre thermisch gegenseitig. Ein thermischer Kurzschluss ist die Folge, was die Wärmeleistung verringert. Um die Kurzschlusspotenziale zu verringern werden die Doppel-U-Rohre mit Abstandshaltern in die Bohrung eingefügt. (Häfner et al., 2015). Einfach-U-Rohre bestehen aus nur einem U-Rohr in der Bohrung. Gerade bei tiefen Bohrungen ab 250 m wird diese Variante eingesetzt (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010). Koaxialsonden bestehen aus zwei Rohren, wobei ein Rohr innerhalb des anderen zentriert ist. Der Vorteil gegenüber den U-Rohren sind der Einbau eines Innenrohres mit einem dickeren Wanddurchmesser und somit eines größeren thermischen Widerstandes. Ein größerer thermischer Widerstand bedeutet eine geringere gegenseitige Beeinflussung (Häfner et al., 2015). Diese Sonden-Gestaltung wird bis maximal 60 m Tiefe eingebaut (Bauer et al. 2018). Begründet liegt die geringe Einbautiefe in einer hohen Festigkeit des Außenrohres gegenüber vereistem Untergrund. Bei größeren Tiefen besteht die Notwendigkeit Stahlrohre einzubauen, welche teurer sind als Polyethylen-Rohre (Häfner et al., 2015).

Die Bohrtiefen der einzelnen Sonden-Bohrungen hängen von der Leistung der Wärmepumpen, sowie der spezifischen Entzugsleistung $p_{E,S}$ der umgebenden Gesteine ab. Berechnet wird die Gesamtbohrtiefe $L_{s,ges}$ nach (Glaesmann, 2022)

$$L_{s,ges} = \frac{\Phi_{HL}}{p_{E,S}} \quad \text{Formel 19}$$

Damit lässt sich die Anzahl an Erdsonden innerhalb einer Grundstücksfläche berechnen

$$n_s = \frac{L_{s,ges}}{l_s} \quad \text{Formel 16}$$

2.5.4 Grundwasser

In diesem Kapitel wird zuerst auf den allgemeinen Aufbau und die Funktionsweise von Grundwasserbrunnen erläutert. Anschließend werden die technischen und hydrologischen Grundlagen für eine Auslegung unter Erläuterung von Formeln, beschrieben. Gerade auf die geologischen und hydrologischen Bedingungen wird explizit eingegangen.

Innerhalb der oberflächennahen Geothermie zählt die direkte Erschließung von Grundwasser zu den offenen Systemen. Grundwasserbrunnensysteme bestehen aus einem Förderbrunnen und einem Schluckbrunnen, auch Injektionsbrunnen genannt. Mit einer Tauchpumpe wird das Grundwasser aus der grundwasserführenden Schicht an die Oberfläche gefördert. Dort wird dem Wasser in einem Wärmetauscher die geothermische Wärme entzogen und über den Injektionsbrunnen wieder der gleichen Grundwasserschicht zugeführt (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010). Bei dem offenen System dient das Grundwasser als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Im Gegensatz zu geschlossenen Systemen, mit Sole, dient das Grundwasser zusätzlich als Wärmeträgermedium (Stober & Bucher, 2012).

Diese Nutzung der Wärmegewinnung ist effizient, da durch das Trägermedium Grundwasser nur geringe Wärmeverluste auftreten (Stober & Bucher, 2012). Zudem weist das Grundwasser in Deutschland in einer Tiefe von 10 m eine ganzjährig nahezu konstante Temperatur von 8 °C

bis 12 °C auf. Die Abkühlung des Wärmeträgermediums in dem Wärmetauscher der Wärmepumpe darf maximal 5 K betragen (Häfner et al., 2015). Die Einbautiefe der Brunnenrohre beträgt je nach Lage des Grundwasserspiegels in der Region zwischen 5 m und 15 m (Stober und Bucher 2012). In der Praxis sind Tiefen unterhalb von 10 m bis maximal 20 m gängig, da in kleinen Tiefen die Verunreinigungen der Grundwasserleiter zu hoch sind. Unterhalb von 20 m ist die benötigte Pumpleistung zu hoch und eine Wasser-Wärmepumpe nicht mehr wirtschaftlich (Glaesmann, 2022).

Der Aufbau von Grundwasserbrunnenanlagen orientiert sich an der Fließrichtung des Grundwassers. Die Installation des Förderbrunnens erfolgt oberhalb der Grundwasserfließrichtung. Der Injektionsbrunnen wird unterhalb des Förderbrunnens in Fließrichtung installiert. Begründet liegt diese Installationsweise in der Vermeidung einer thermischen Beeinflussung des zu fördernden Wassers durch das abgekühlte Wasser. Ansonsten kann es zu thermischen Kurzschlüssen im Grundwasser führen, wodurch die Effizienz der Wasser-Wärmepumpe sinkt. In der Literatur wird ein Abstand von 10 m bis 15 m zwischen den beiden Brunnen empfohlen. Dieser Abstand dient der Regeneration des Grundwassers (Pistohl, 2013).

Förderbrunnen und Schluckbrunnen sind ähnlich aufgebaut. Jeder Brunnenschacht setzt sich aus einem Filterrohr, welches in Filterkies eingebettet ist, zusammen. Mit dem Filterkies wird das Grundwasser vor dem Eintritt in den Wärmetauscher von Schmutzpartikeln gereinigt. Ohne Filtrierung setzen sich Schmutzpartikel an den Wärmeübertrager und reduzieren dadurch den Wirkungsgrad. Für die Dimensionierung der Förderanlagenkomponenten ist die zu fördernde Wassermenge ausschlaggebend. Die Wassermenge ist von der zu entziehenden Wärmeleistung abhängig (Tiator & Schenker, 2013a). Die Entzugsleistung beträgt

$$\dot{Q}_W = \dot{m}_W \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{Formel 17}$$

Der zu entnehmende stündliche Volumenstrom lässt sich nach VDI 4640-2 berechnen zu

$$\dot{V}_{N,h} = \frac{\Phi_{HL}}{\Delta T \cdot \rho \cdot c_p} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{h} \quad \text{Formel 18}$$

Für die Ermittlung des benötigten Volumens im Jahr wird Formel 23 mit den Volljahrestunden multipliziert und es ergibt sich

$$\dot{V}_{N,a} = \dot{V}_N \cdot b_{VH} \quad \text{Formel 19}$$

Im Förderbrunnen wird die Tauchpumpe ober- oder unterhalb des Grundwasserspiegels positioniert. Liegt die Pumpe im Grundwasser, so muss das Wasser an die Oberfläche gedrückt werden, was energetisch effizienter als Ansaugen ist (Tiator und Schenker 2013a). Für einen möglichen Austausch der Pumpe oder Wartungszwecken sind die Brunnenrohre in Brunnenkammern zu installieren. Dies dient zudem einer möglichen Entlüftung der Rohre und der Vermeidung von Schwitzwasserbildung. Die Brunnenkammern sind wegen der sensiblen Ökologie des Grundwassers gegen den Zutritt von Unbefugten zu sichern (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2010).

Trotz der hohen Effizienz bei dem Einsatz von Grundwasser als Wärmequelle, unterliegt die Auslegung verschiedenen rechtlichen und geologischen Voraussetzungen. Unter Beachtung der Fördermenge ist eine ausreichende Grundwasserverfügbarkeit am Standort zu gewährleisten. Die damit verbundene Entnahme- und Rückspeisungsmenge kann beim zuständigen Amt für Wasserwirtschaft erfragt werden (Pistohl, 2013). Ab einer bestimmten Entnahmemenge wird eine wasserrechtliche Genehmigung benötigt, da die Temperaturdifferenz zwischen dem Grundwasser und dem wieder zugeführten Wasser zu mikrobiologischen Reaktio-

nen und damit zu einer Kontamination des Grundwassers führen kann. Dabei sind Temperaturerhöhungen des Grundwassers kritischer einzuschätzen, als die Zufuhr von abgekühltem Wasser. Durch die Temperaturspreizung ist eine Änderung der Wasserqualität möglich (Häfner et al., 2015). Gerade die Wasserqualität spielt bei der Beurteilung der Effizienz als Wärmequelle für die Wasser-Wärmepumpe eine große Rolle. Schon eine geringe Eisen- oder Mangankonzentration im Wasser, sowie ein pH-Wert größer als 7 kann den Betrieb einer Wasser-Wärmepumpe geringer wirtschaftlich machen. Bei größeren Konzentrationen von Mangan oder Eisen kann es zu Verockerung (Ablagerung) in den Brunnenrohren kommen (Glaesmann, 2022). Verockerung entsteht bei der chemischen Verbindung von Eisen- oder Mangan-Ionen mit Sauerstoff. Deshalb ist die Rohrtiefe des Brunnens unterhalb des Grundwasserspiegels einzusetzen (Hartmann, 2006). Bei Verockerung besteht sowohl das Risiko eines Ausfalls der Wärmepumpe, als auch ein Überlaufen des Schluckbrunnens. Aus diesem Grund werden bei Wasser-Wärmepumpe vielfach eine Systemtrennung von Grundwasser und Wärmepumpe vorgenommen. Dabei wird zwischen Grundwasser und Wasser-Wärmepumpe ein weiterer Kreislauf mit einem Wärmeübertragungsmittel installiert. Bei einem zusätzlichen Zwischenkreislauf treten Übertragungsverluste von ca. 3 K auf. Zudem wird Strom für die Pumpe im Zwischenkreislauf benötigt. Es ergibt sich eine um wenige Prozente geringere Leistung der Wärmepumpe (Bonin, 2018).

2.6 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbewertung

Aufbauend auf den technischen Grundlagen aus den Kapiteln 2.1 bis 2.5 werden nun die Grundlagen einer wirtschaftlichen Bewertung erläutert. Dabei werden zuerst die betriebswirtschaftlichen Investitionsverfahren dargelegt. Daran anschließend erfolgt die Beschreibung der zu beachtenden Kostenarten in einer Investitionsberechnung.

In der Energietechnik werden Wärmepumpen-Systeme nach der VDI 2067-1 bewertet. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgt nach der Annuitätenmethode, welche den dynamischen Investitionsverfahren zugeordnet wird.

Die dynamischen Verfahren sind in die Kapitalwertmethode, der Methode des internen Zinseszinses und die Annuitätenmethode gegliedert. In den dynamischen Verfahren werden die unterschiedlichen Zeitpunkte von Zahlungseingängen und Zahlungsausgängen in der Investitionsberechnung berücksichtigt. Dies ist der Hauptunterschied zu den statischen Verfahren, welche keinen Wertverlust der Zahlungen in der Zukunft berücksichtigen (Becker & Peppmeier, 2018).

Der Kapitalwert einer Investition wird durch die Summe aller Ein- und Auszahlungen zum Zeitpunkt $t_1 - t_n$ beschrieben. Dabei werden alle Ein und Auszahlungen auf den Barwert zum Zeitpunkt t_0 berechnet. Der Barwert einer zukünftigen Zahlung wird durch einen Abzinsungsfaktor kalkuliert. Für Zahlungen in der gleichen betrachteten Periode t sind auch die Abzinsungsfaktoren gleich (Schuster & Rüd von Collenberg, 2017)

$$K_0 = \sum_{t=0}^n \frac{E_t - A_t}{(1 + i)^t} \quad \text{Formel 20}$$

Die Kapitalwertmethode dient der Entscheidung, ob eine Investition vor Ausführung über die gesamte Lebensdauer vorteilhaft ist. Wird in der Berechnung ein Kapitalwert von null oder größer null erreicht, so folgt als Interpretation des Ergebnisses, dass die Einzahlungen in der Zukunft die zukünftigen Auszahlungen und die Angangsinvestition decken. Als Quintessenz dieser Aussage ergibt sich für den Investor, die Investition zu tätigen (Becker & Peppmeier, 2018).

Die Methode des internen Zinssatzes ist eine veränderte Darstellungsform der Kapitalwertmethodenformel. Während bei der Kapitalwertmethode der Kapitalwert zum Zeitpunkt t_0 gesucht wird, weist dieser Variable bei der Methode des internen Zinssatzes den Wert null auf (Becker & Peppmeier, 2018)

$$r = \sqrt[n]{\frac{EZ\ddot{U}_n}{A_0}} - 1 \quad \text{Formel 21}$$

Mit der Berechnung eines internen Zinssatzes wird das Ziel verfolgt die Rentabilität einer Investition zu bewerten. Damit kann der interne Zinssatz als Entscheidungshilfe dienen, ob eine angebotene Verzinsung für eine Investition einen Vorteil bietet. Liegt der gebotene Zinssatz unterhalb des berechneten Zinssatzes, so ist es nicht sinnvoll die Investition zu tätigen (Becker & Peppmeier, 2018).

Wie die Methode des internen Zinssatzes beruht die Annuitätenmethode auf den Grundlagen der Kapitalwertmethode. Die Annuitätenmethode stellt eine Vergleichbarkeit der Kosten und Erlöse zu den verschiedenen Zeitpunkten innerhalb der Investitionsdauer her und bildet einen gleichmäßigen Betrag (Annuität) während der Nutzungsdauer ab. Eine positive Annuität beschreibt den Jahresperiodenerfolg einer Investition. Die Berechnung der Annuität erfolgt nach (Becker & Peppmeier, 2018)

$$a = K_0 * \frac{(1+i)^n * (1+i-1)}{(1+i)^n - 1} \quad \text{Formel 26}$$

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe werden Kosten in vier Kategorien unterteilt. Diese Kategorien sind die kapitalgebundenen Kosten, die bedarfsgebundenen Kosten, die betriebsgebundenen Kosten, sowie die sonstigen Kosten.

- Zu den kapitalgebundenen Kosten K_i gehören die Investitionskosten der Wärmepumpe und die Erschließungskosten der Wärmequelle. Je größer die Anzahl der benötigten Wärmepumpe und deren Nennleistungen, desto höher liegen die Investitionskosten. Jedoch verringern sich die Kosten pro erzeugte Kilowattstunde mit der zunehmenden Größe der Wärmepumpe (Glaesmann, 2022). Weitere Kosten sind bauliche Kosten der Anlagen und Anschlusskosten an das vorhandene Heizungssystem. Diese sind je nach Wärmepumpenart unterschiedlich. Es ist zu beachten, dass die Investitionskosten für Sole-Wärmepumpen und Wasser-Wärmepumpen höher sind als die für Luft-Wärmepumpen, da die Wärmequelle in der Erde erst mit Kollektoren, Sonden oder Brunnen erschlossen werden muss. Die Investitionskosten der Erschließung sind dabei von den jeweiligen geologischen Bodenbedingungen abhängig (Glaesmann, 2022).
- Bedarfsgebundene Kosten K_b sind unterteilt in Kosten für Energie und Kosten für Betriebsstoffe (VDI). Energiekosten sind bei Wärmepumpen die Kosten für den eingesetzten Strom. Der benötigte Strombedarf lässt sich aus dem SCOP-Wert berechnen (Siehe Formel 27). Je effizienter der berechnete SCOP, desto weniger Energie benötigt die Wärmepumpe zur Deckung des Gebäudewärmebedarfs und desto geringer sind die Energiekosten (Glaesmann, 2022). Unter Betriebsstoffen versteht man Schmierstoffe für Pumpen und Zusatzchemikalien, wie die Sole in Kollektorrohren oder Sonden.

$$K_{b,el} = \frac{\dot{Q}_{HL}}{SCOP_{WPA}} * k_{b,el} \quad \text{Formel 27}$$

- Eine weitere Kostenart sind die betriebsgebundenen Kosten $K_{betr.}$. Diese setzen sich zusammen aus Reinigungs-, Wartungs- und Instandsetzungskosten. Bei Gas- und Ölheizun-

gen ergeben sich die betriebsgebundenen Kosten aus den Kosten für den Schornsteinfeger, welcher jährlich eine Abgasmessung und Reinigung der fossilen Heizung durchführt. In Wärmepumpensystemen spielen diese Kosten eher eine untergeordnete Rolle. Einmal im Jahr ist der Anlagenkreislauf auf Dichtheit und der Kältemittelanteil zu überprüfen. Die Wartungskosten sind von der Anlagengröße, sowie Wärmepumpenart unabhängig (Glaesmann, 2022).

- Unter die Kategorie sonstige Kosten K_s fallen Planungskosten für die Erstellung von Angeboten und Versicherungskosten. Zudem sind Entsorgungskosten der alten Heizkessel und gegebenenfalls Umbaukosten der Heizungsanlagen hinzuzuzählen.

Tabelle 3 Kostengruppen und Kostenarten

Kostenart	Kosten
Kapitalgebundene Kosten	Investitionskosten Wärmepumpen Erschließungskosten Kosten für Umbaumaßnahmen an den Gebäuden Anschlusskosten
Bedarfsgebundene Kosten	Energiekosten Betriebsstoffe
Betriebsgebundene Kosten	Reinigungs-/Wartungs-/Instandhaltungskosten
Sonstige Kosten	Planungskosten Versicherungskosten Entsorgungskosten

3 Beschreibung der Liegenschaftsgebäude

Die Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel bestehen aus insgesamt fünf Liegenschaften. Alle Grundstücke sind mit einem oder mehreren Mehrfamilienhäusern bebaut. Die Gebäude liegen an den Straßenadressen: Fiedlerweg 24-34, Lucasweg 6, Dieburgerstraße 75, Dieburgerstraße 85-87, sowie dem Hoetgerweg 10-12. Begrenzt werden die Liegenschaften im Norden durch die Dieburgerstraße, sowie in südlicher Richtung durch den Hoetgerweg. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, werden die Gebäude westlich mit der Straße Lucasweg und östlich durch den Spessarting im Übergang zum Fiedlerweg abgegrenzt.



Abbildung 6 Luftbild Gebäude Mathildenhöhe (Alphabet Inc. 2024)

Fiedlerweg 24-34 Der Wohnblock Fiedlerweg 24-34 besteht aus insgesamt 3 mehrstöckigen Gebäudeeinheiten, welche sich in die Wohnblöcke A, B und C aufteilt. Alle Gebäude des Wohnblocks liegen am unteren südöstlichen Rand der beschriebenen Liegenschaftseingrenzung. Die Häuser sind freistehend in U-Form zueinander angeordnet. Unterhalb der Gebäude liegt eine gemeinsam genutzte Tiefgarage, welche alle drei Gebäude miteinander verbindet.

Haus A ist ein viergeschossiges Mehrfamilienhaus und wurde 1980 erbaut. Mit 27 Wohnungen ist es zudem das größte Haus der Liegenschaft Fiedlerweg. Die Gebäudenutzfläche beträgt 2292 m². Seit dem Baujahr wurden bis auf den Austausch einiger Fenster keine großen Sanierungsarbeiten durchgeführt. Die Außenwände sind von innen und außen verputzt. Eine weitere Dämmungsschicht unter dem Putz existiert nicht. Auch die Kellerdecke zum Erdgeschoss ist nicht separat gedämmt. Die Fenster weisen unterschiedliche Isolationsstufen auf. Die Isolation liegt zwischen einfach bis dreifacher Verglasung (Schwarz, 2022b).

Das Haus C liegt seitlich des Haus A und begrenzt die drei Gebäude in westlicher Richtung. Wie das Haus A wurde das Gebäude C im Jahr 1980 gebaut. Die Anzahl an Wohneinheiten beträgt 12, bei einer Gebäudenutzfläche von ca. 1931 m². Von allen drei Gebäuden ist das Haus C das Haus mit der geringsten Geschossanzahl von sechs. Wie im Haus A ist die Kellerbetondecke unterseitig nicht gedämmt. Die Fenster in den Wohnungen und Fluren weisen hauptsächlich eine zweifache Verglasung auf. Türen mit Fenstern sind meistens aus einem Aluminiumrahmen mit einer Einfachverglasung (Schwarz, 2022c).

Nördlich des Haus A und östlich des Haus C, liegt das Haus B. Dieses ist mit einer Gebäudenutzfläche von 825 m² das kleinste unter den drei Häusern. Die Wohnungsanzahl und das Baujahr sind äquivalent zu denen des Hauses A. Nach dem individuellen Sanierungsfahrplan (iSFP) ist der Dämmungszustand des Gebäudes in einem ähnlichen Zustand (Schwarz, 2022a).

Alle drei Gebäude werden durch eine Zentralheizung beheizt, welche zudem das Warmwasser für die Bewohner bereitstellt. Als Energieträger wird Erdgas verwendet. Da die Zentralheizung im Kellergeschoss des Hauses A steht, werden die Häuser B und C durch Rohre, welche durch die Tiefgarage verlaufen, mit Wärme versorgt. Das Baujahr der Heizung konnte mit den vorliegenden Daten nicht ermittelt werden (Schwarz, 2022b).



Haus A



Haus B



Haus C

Abbildung 7 Die Gebäude der Gruppe Fiedlerweg 24-34

Lucasweg 6 Am süd-westlichen Rand der fünf Liegenschaften liegt das Mehrfamiliengebäude des Lucaswegs 6. Dieses ist eines der ältesten Gebäude der Liegenschaft und wurde 1977 erbaut. Das Gebäude beinhaltet 34 Wohnungen, welche auf acht Etagen verteilt sind. Die Gebäudenutzfläche beträgt 3905 m². Geheizt wird mit einem Erdgaskessel, der auf dem Dach gelegen ist. Dieser wurde im Jahr 1999 eingebaut. Die Warmwasserbereitung erfolgt dezentral in jeder Wohnung über Durchlauferhitzer. Informationen zu getätigten Sanierungsmaßnahmen, sowie dem Dämmungszustand liegen nicht vor (Kolb, 2013).



Abbildung 8 Links: Lukasweg 6, rechts Dieburgerstraße 75

Dieburgerstraße 75 Direkt angrenzend an den Lucasweg 6 liegt das Gebäude Dieburgerstraße 75. Das Gebäude wurde im gleichen Jahr, wie der Lucasweg 6 erbaut. Die Dieburgerstraße 75 weist 10 Geschosse mit insgesamt 48 Wohnungen auf. Die Nutzfläche beträgt 4920 m². Auch in diesem Gebäude wird ein Erdgaskessel nur für die Heizungswärme betrieben, welcher 1998 im Dachgeschoss eingebaut wurde. Auch bei diesem Gebäude liegen keine Angaben zum Dämmzustand vor (Kolb, 2013).

Dieburgerstraße 85 Östlich der Dieburgerstraße 75 liegt das Mehrfamilienhaus Dieburgerstraße 85. Dieses wurde zusammen mit der im Süden angrenzenden Dieburgerstraße 87 im Jahr 1983 gebaut. Beide Gebäude haben sechs Vollgeschosse. Im Vergleich beider Häuser, beinhaltet die Dieburgerstraße 85 18 Wohnungen bei 1983 m² Nutzfläche, und ist damit größer als das einseitig abgebaute Nachbarhaus mit 17 Wohnungen und 1813 m² Nutzfläche. Eine zentrale Erdgasheizung im Dachgeschoss produziert Heizungswärme und in einem Speicher Warmwasser für die Wohnungen. Die Heizung wurde im Jahr 2001 eingebaut und versorgt beide Häuser mit Heizwärme (Hoss, 2023). Da ab dem Jahr 1977 die erste Wärmedämmungsverordnung in Kraft getreten ist, wurde bei Bau des Gebäudes eine Fassadendämmung auf die Außenwand aufgetragen (Bauer et al., 2012). Die Holzfenster sind mit Doppelverglasung versehen (Hoss, 2023).

Hoetgerweg 10-12 Südlich der Dieburgerstraße 87 und nördlich des Fiedlerwegs Haus B liegt das Mehrfamilienreiheneckhaus Hoetgerweg 10-12. Mit dem Baujahr 1984 ist es das jüngste Gebäude in der Liegenschaft. Das Haus beinhaltet 61 Wohnungen und hat eine Gesamtnutzfläche von 3982 m². Auch hier ist, wie in allen vorher beschriebenen Gebäuden der Energieträger Erdgas (Markert, 2018). Bei Gespräch mit einer Eigentümerin ergab sich bei einer Begehung der Liegenschaft, dass der vorherige Gaskessel im Jahr 2022 durch eine neue Brennwertgasheizung ersetzt wurde. Angaben zum Dämmungszustand des Gebäudes liegen nicht vor. Da das Mehrfamilienhaus parallel zu den Gebäuden der Dieburgerstraße 85-87 gebaut wurde, kann ein ähnlicher Dämmungszustand angenommen werden.

Von den Liegenschaften stehen dreijährige Verbrauchsdaten zur Verfügung. Die vorliegenden Jahre der Verbrauchserfassung unterscheiden sich je nach Gebäude. Alle erfassten Verbrauchsdaten liegen in dem Jahresintervall 2018 bis 2022. Unterteilt werden die Daten in einen Anteil für die Heizungswärme und einem Anteil für die Bereitstellung von Warmwasser. Während einige Häuser Warmwasser und Heizwasser zentral über den Gaskessel beziehen, haben andere Häuser die Versorgung mit Durchlauferhitzern von der Heizung getrennt. Außerdem ist für die Wirtschaftlichkeitsberechnung zu beachten, dass die Eigentümer der Liegenschaft Lucasweg 6 auch Eigentümer der Dieburgerstraße 75 sind.



Abbildung 9 Links und Mitte: Dieburgerstraße 85-87, Rechts Hoetgerweg 10-12

4 Methodik

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der technischen und wirtschaftlichen Analyse, ob die Substitution der Wärmeerzeuger durch Wärmepumpe möglich und wirtschaftlich vorteilhaft ist. Dazu werden im nächsten Abschnitt das methodische Vorgehen für die technische Betrachtung und der wirtschaftlichen Bewertung erläutert. Als Grundlage für die Analysen werden im zweiten Abschnitt des Methodenteils die relevanten Einflussvariablen und deren Variablenwerte beschrieben.

4.1 Datenaufbereitung

Nach der Beschreibung der technischen Grundlagen und der zu analysierende Gebäude, werden im nächsten Schritt die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit der verschiedenen Wärmequellenalternativen auf den Liegenschaften analysiert. Dazu werden als Auslegungsgrundlage die einzelnen Heizlasten der Gebäude berechnet. Die Heizlastberechnung teilt sich auf in die Berechnung beruhend auf dem aktuellen Verbrauchszustand der Gebäude und in eine Berechnung des Wärmebedarfs und Heizlast nach Sanierungsmaßnahmen.

Gerade die monovalente Betriebsweise ergibt ohne eine Gebäudesanierung und damit Reduktion der Heizlast keinen wirtschaftlichen Nutzen gegenüber einer Gasheizung (Bohne, 2022). Die Rahmenbedingungen für die anschließende Auslegung der Wärmequellen und Wärmepumpen wird in diesem und im folgenden Kapitel festgelegt. Für die technische Analyse der Wärmequelle in der oberflächennahen Geothermie werden nach der Heizlastberechnung die geologischen und hydrologischen Bedingungen an der Mathildenhöhe in Darmstadt analysiert.

Aufbauend auf den Rahmenparametern werden Wärmepumpen der Hersteller Stiebel Eltron, Buderus, sowie AERMEC ausgesucht und parallel mit einander verschaltet. Die Dimensionierung erfolgt für die Luft-Wärmepumpen als bivalentes Wärmezeugungssystem in Kombination mit einem Gaskessel basierend auf den aktuellen Heizlasten. Bei der Sole-Wärmepumpe und der Wasser-Wärmepumpe werden diese als monovalentes System ausgelegt. Berechnungsgrundlage sind die Heizlasten nach Sanierungsmaßnahmen. Daran anschließend wird die mögliche verfügbare Grundstücksfläche zur Erschließung der Wärmequelle bestimmt. Abschließend erfolgt für die einzelnen Wärmequellen-Systeme Luft, Kollektor, Sonde und Grundwasserbrunnen die technische Analyse der Auslegung auf den verfügbaren Grundstücksflächen.

Die Heizlastberechnung erfolgt nach dem Verfahren von Hitchin & Hyde (Day, 2006), da dieses Verfahren die verschiedenen Jahresverbrauchsdaten hinsichtlich der Außentemperatur bereinigt. Alle anderen beschriebenen Verfahren berücksichtigen die schwankenden Außentemperaturen in verschiedenen Jahren nicht. Ein weiterer Grund für die Auswahl des Verfahrens von Hitchin & Hyde ist, dass es für die Heizlastberechnung ohne Trinkwassererwärmung ausgelegt ist. Bei den anderen vorgestellten Näherungsverfahren erfolgt die Heizlastberechnung für die Heizung und das Trinkwasser. Für die Analyse der Heizlasten aus den vorliegenden Verbrauchsdaten der einzelnen Gebäude müssen die Daten wegen der Heterogenität aufbereitet werden. Hierfür werden die Gradtage mit Hilfe des IWU-Tools Gradtagzahlen-Deutschland bestimmt. Innerhalb des Tools sind die Einstellung verschiedene Rahmenparameter vorzunehmen. Die Rahmenparameter sind der Standort, Höhenkorrektur, Innenraumtemperatur und Heizgrenztemperatur.

- Als Standort für die Gradtagzahl wird die Postleitzahl der Liegenschaften in Darmstadt angegeben.

- Eine mögliche Höhenkorrektur in dem Excel-Tool erfolgt nicht. Bei den Messstationen wird eine Gewichtung der Messstationen zugelassen.
- Für die Innenraumtemperatur wird 20 °C gewählt. Die Heizgrenztemperatur liegt für Bestandsgebäude nach VDI 4108-6 bei 15 °C (Loga, 2003).

Mit Ermittlung der Gradtagzahlen für die Liegenschaften in Darmstadt können die einzelnen Gebäudeheizlasten berechnet werden.

Als Ausgangsgrundlage für die Dimensionierungen der Kollektoren, Sonden und Grundwasserbrunnen werden die geologischen und hydrologischen Bedingungen an der Mathildenhöhe im Kapitel 5.3 bestimmt. Die vorliegende Bodenstruktur und Gesteinsart werden über eine Literaturrecherche und dem Tool Geologie-Viewer des Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) ermittelt. Dieses Tool dient auch für die Bestimmung von Bodenkennwerten, welche für die Auslegung benötigt werden. Die Hydrologie-Analyse dient für die Dimensionierung der Wasser-Wärmepumpe. Es werden die wichtigsten Mineralien, welche einen Einfluss auf die Nutzung von Grundwasser haben, mit den möglichen Folgen für die Wasser-Wärmepumpe bei einer Veränderung, erläutert. Zudem erfolgt die Darlegung der Herstellerwerte, ab welchen Mineralkonzentrationen ein Zwischenkreislauf für den Schutz der Wasser-Wärmepumpe erforderlich ist.

Anschließend erfolgt unter Beachtung der getroffenen Annahmen bei der technischen und wirtschaftlichen Analyse die Auswahl einer passenden Luft-Wärmepumpen-Serie. Ist eine geeignete Luft-Wärmepumpen-Serie gefunden, so wird eine Luft-Wärmepumpe mit einer bestimmten Nennleistung ausgesucht. Dazu werden die Nennleistungen durch die Heizlasten der einzelnen Gebäude geteilt. Ausgewählt wird die Wärmepumpe innerhalb der Serie, welche ein möglichst ganzzahliges Verhältnis zu den einzelnen Heizlasten und der Gesamtheizlast aufweist, da so der elektrische Heiz-Stab geringe Einsatzzeiten aufweist. Wenn die Hersteller den Wärmepumpen eine Gebäudekategorie zuweisen, sollten die einzelnen Wärmepumpen für Mehrfamilienhäuser bis Gewerbeimmobilien ausgelegt sein. Nach Auswahl einer Luft-Wärmepumpe erfolgt die bivalente Auslegung mit den folgenden Schritten.

- Zuerst wird der Bivalenzpunkt über die Heizungsvorlauftemperatur berechnet.
- Im zweiten Schritt folgt die Kalkulation der Anzahl an benötigten Luft-Wärmepumpen und die parallele Dimensionierung für den Bivalenzpunkt.
- Nach der parallelen Verschaltung lässt sich über den COP-Wert der Hersteller der SCOP-Wert nach VDI 4650 berechnen. Da der SCOP-Wert im bivalenten Betrieb vom Deckungsgrad der Wärmepumpe an der Gesamtheizlast abhängt, muss dieser nach der parallelen Verschaltung berechnet werden.
- Aus diesen Werten kann der SCOP-Wert der Wärmepumpenanlage gebildet werden. Im bivalenten Betrieb besteht die Anlage aus dem Gaskessel und der Wärmepumpe. Im monovalenten Betrieb sind in der Anlage nur die Wärmepumpen enthalten. Die Ermittlung des Wertes dient in dem Kapitel Wirtschaftlichen Betrachtung für die Ermittlung der Stromkosten.

Für die weitere Analyse der Wärmequellen Erde und Grundwasser werden die an der Mathildenhöhe nutzbaren Freiflächen unter Zuhilfenahme des Entwurfs zum Bebauungsplan O 32-Mathildenhöhe-Ost bewertet (Wissenschaftsstadt Darmstadt, 2020). Die verwendbare Fläche ergibt sich aus der Reduktion von nicht überbauten Flächen um Freiflächen mit Denkmalschutzstatus und ökologisch geschützten Bereichen.

Die Auswahl der Sole-Wärmepumpe erfolgt äquivalent zu den Auswahlritten der Luft-Wärmepumpe. Die Sole-Wärmepumpen werden in der monovalenten Betriebsweise dimensioniert. Äquivalent zu der SCOP-Berechnung für die Luft-Wärmepumpe wird die Jahresarbeitszahl für den monovalenten Betrieb kalkuliert. Für die Erschließung der Wärmequelle mit Kollektoren und Sonden, wird als Auslegungsgrundlage die VDI 4640 genutzt.

Grundsätzlich ist die VDI 4640 nur für die Auslegung von Erdwärmeanlagen mit einer maximalen Größe von 30 kW geeignet. Ab einer Anlagengröße größer als 30 kW sind detailliertere Analysen der Boden-Parameter und der hydrologischen Parameter mit Hilfe von Probebohrungen und numerischen Simulationen nötig. Trotz dieser Einschränkung werden in dieser Arbeit die Daten und Formeln in Anlehnung an die VDI 4640 genutzt. Sollte die Eigentümergesellschaft sich dafür entscheiden, in Zukunft mittels Erdkollektoren, Sonden oder Grundwasser den Wärmebedarf zu decken, ist eine detailliertere Datenerhebung erforderlich. Mit den in der VDI 4640 definierten Abstandsbedingungen wird im Kapitel 5.6 die mögliche Kollektorfläche und Anzahl an Sonden in der Liegenschaft berechnet. Unter Nutzung der Formeln aus den Grundlagenkapiteln und ermittelten Bodenentzugsleistungen mit Hilfe der VDI 4640, können die benötigten Kollektorflächen und nötigen Sondentiefen bestimmt werden.

Als weitere Wärmequelle wird eine Wasser-Wärmepumpe mit der Nutzung von Grundwasser als Wärmeübertragungsmedium analysiert. Die Auswahl der passenden Wasser-Wärmepumpe und die monovalente Auslegung einer parallelen Verschaltung, sowie die SCOP-Berechnung, erfolgt analog zu den Schritten zur Dimensionierung der Sole-Wärmepumpe. Mit den hydrologischen Bedingungen wird verglichen, ob die Wasser-Wärmepumpe für die direkte Nutzung von Grundwasser geeignet oder ob der Einbau eines Zwischenkreislaufs nötig ist. Darauf folgend wird im Kapitel 5.6 nach den Erdkollektoren und Erdsonden die nötige Förderleistung der Brunnen für die Heizlastdeckung ermittelt.

Neben der technischen Analyse von verschiedenen Wärmequellen verfolgt diese Arbeit das Ziel einer wirtschaftlichen Bewertung der mit der Umrüstung einhergehenden Investitionen. Es erfolgt ein Vergleich und Bewertung der aktuellen und geschätzten zukünftigen Heizkosten bei Nutzung fossiler Brennstoffe mit den Kosten für die Erschließung der Wärmequellen und die Wärmepumpe. Die nötigen wirtschaftlichen Annahmen sind im Kapitel 4.2 beschrieben und begründet.

Ausgehend von den Dimensionierungen der Wärmepumpe und Wärmequelle können die resultierenden Investitionskosten bestimmt werden. Diese Gesamtkosten der Investitionen werden in Kosten für die Wärmepumpe und Kosten für die Erschließung der Wärmequelle aufgeteilt.

Für die Wärmepumpenkosten werden die Preise der Wärmepumpen bei den Herstellern angefragt. Gibt es keine Rückmeldung, so erfolgt die Abschätzung der Listenpreise mit Hilfe einer Onlinerecherche. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den Kosten nur um die reinen Investitionskosten pro Wärmepumpe handelt, welche mit der Anzahl der Wärmepumpen multipliziert wird.

Bei der realen Planung und Auslegung einer parallelen Wärmepumpenverschaltung durch ein Fachunternehmen wird diese Verschaltung auf die Anforderungen des Kunden abgestimmt. Es ergeben sich individuelle Projektkosten, je nach gewünschtem und nötigem Zubehör des Kunden. Teil der Projektkosten sind zudem nötige Umbaumaßnahmen der Gebäude für die Installation einer Wärmepumpe. Da innerhalb dieser Arbeit keine Angebote für nötige Umbaumaßnahmen der Gebäude vorliegen, werden nur die reinen Investitionskosten der Wärmepumpe betrachtet.

Für die Erschließungskosten der Wärmequelle, sowie die Wartungskosten werden Werte aus der Literatur verwendet, da die Kosten sehr spezifisch vom beauftragten Unternehmen und der geologischen, hydrologischen Bedingungen des Standorts abhängen. Aus den minimalen und maximalen Literaturwerten für die Erschließungskosten werden Mittelwerte berechnet und als Berechnungsgrundlage verwendet. Die bedarfsgebundenen Kosten für Energie werden über den SCOP-Wert der jeweiligen parallel verschalteten Wärmepumpen ermittelt.

Sonstigen Kosten werden in dieser Arbeit vernachlässigt. Auch möglich Mengenrabatte bei dem Kauf von mehreren Wärmepumpen werden nicht betrachtet.

Nach der Kumulation der Investitionskosten werden die möglichen Förderungen in Form von Zuschüssen erläutert. Dazu werden auf Bundes-, auf Städtischer- und auf Hersteller-Ebene die Förderprogramme analysiert. Spezielle Landesförderungen für die reine Installation einer Wärmepumpe existieren zu dem Zeitpunkt dieser Arbeit nicht. Diese Zuschüsse, welche für die Installation der ausgewählten Wärmepumpe oder dem Ausbau einer Wärmequelle beantragbar sind, werden von den Investitionen subtrahiert.

Für die Finanzierung der Investitionen nach Abzug der Zuschüsse wird exemplarisch ein KfW-Darlehen angenommen und in eine Annuität umgerechnet. Zu dieser Annuität werden die jährlichen bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten addiert. Die bedarfsgebundenen Kosten werden für die drei Wärmepumpen-Varianten der technischen Auslegung analysiert. Anschließend erfolgt ein Vergleich der zukünftigen Gaskosten mit den Annuitäten der technischen Varianten.

4.2 Annahmen bei der technischen und wirtschaftlichen Analyse

In diesem Kapitel werden mögliche Einflussfaktoren innerhalb der technischen und wirtschaftlichen Analyse beschrieben. Die Einflussfaktoren, welche die größte Relevanz für die Auslegung und Wirtschaftlichkeitsberechnung aufweisen, werden erläutert.

Die Tabelle 4 gibt hierbei einen Überblick über die möglichen Einflussgrößen bei der Analyse der Wärmepumpe und Wärmequelle. Innerhalb der Tabelle sind die Faktoren nach baulichen Gebäudebedingungen und technisch limitierenden Faktoren bei Auswahl und Anschluss einer Wärmepumpe geordnet. Außerdem werden die Wärmequellen anhand von geologischen und hydrologischen Faktoren beschrieben. Eine weitere Einflusskategorie sind Umgebungsbedingungen, welche die Wärmequellennutzung der Wärmepumpen beeinflussen.

Aus der Tabelle 4 werden anschließend die wichtigsten Einflussvariablen mit den Grenzwerten für eine technische Dimensionierung der Wärmepumpen und deren Wärmequellen ausgewählt und detailliert beschrieben.

Je nach Dämmungszustand der Gebäude ergeben sich verschiedene Wärmeverbräuche. Die vorliegenden dreijährigen Verbrauchsdaten der einzelnen Gebäude dienen als Grundlage für die Berechnung der Gebäudeheizlasten.

Für einen homogenen Heizbetrieb mit Wärmepumpen wird eine mögliche Reduktion der Verbräuche durch Sanierungsmaßnahmen betrachtet. Die zu erreichende Sanierungsstufe der Gebäude wird auf Effizienzklasse B festgelegt, da diese Sanierungsstufe in den Literaturstudien am häufigsten als obere Grenze für einen monovalenten Betrieb angegeben ist (Bauer-mann et al., 2023).

Der resultierende Sanierungsgrad (prozentuale Reduktion des Endenergieverbrauchs) wird aus den Endenergiekosten der Energieausweise als Anfangswert und dem Effizienzzielzustand Klasse B als Endwert ermittelt. Den nötigen individuellen Sanierungsgrad eines Gebäudes für

die Nutzung einer monovalenten Wärmepumpe ist über einen individuellen Sanierungsfahrplan (ISFP) zu ermitteln.

Bei den vorliegenden Energieausweisen handelt es sich um Verbrauchsenergieausweise. Nur für das Gebäude Hoetgerweg 10-12 liegt ein Energiebedarfsausweis vor. Die Energieausweise liegen für alle Gebäude außer dem Gebäude B des Fiedlerweg 24-34 vor. Für den Fiedlerweg als Gesamtliegenschaft von 3 Gebäuden wird aus den zwei vorliegenden Endenergiewerten der Mittelwert gebildet. Da der direkte Vergleich von Verbrauchs- und Bedarfsenergieausweisen wegen unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen nicht möglich ist, wird für das Gebäude Hoetgerweg 10-12 der Endenergiebedarf der Dieburgerstraße 85-87 angenommen. Begründet liegt diese Annahme in demselben Baujahr der Immobilien und damit mit der Annahme eines ähnlichen Endenergiebedarfs.

Tabelle 4 Technische und wirtschaftliche Einflussfaktoren.

Kategorie	Einflussfaktor	Daten verfügbar	Betrachtung
Gebäude	Wärmebedarf	Ja	Ja
	Sanierungszustand	Ja	Ja
	Lage der Heizung	Ja	Nein
	Gebäudestatik	Nein	Nein
	Rechtliche Baubedingungen	Nein	Nein
Wärmepumpe	Vorlauftemperatur	Ja	Ja
	Nennleistung	Ja	Ja
	Schallgrenzwerte	Ja	Nein
Wärmeverteil-system	Wärmeverluste	Nein	Nein
	Anschlüsse von Wärmequellen an Heizungssystem	Nein	Nein
Geologie	Bodenarten Darmstadt	Ja	Ja
	Entzugsleistungen	Ja	Ja
	Temperatur	Nein	Ja, theoretischer Wert
	Tierschutz	Nein	Nein
Hydrologie	Temperatur Grundwasser	Nein	Ja, theoretischer Wert
	Tiefe Grundwasser	Nein	Nein
	Chemische Zusammensetzung	Ja	Ja
Umgebung	Verfügbare Netzleistung	Nein	Nein
	Denkmalschutzflächen	Ja	Ja
Investition	Kosten Wärmepumpe	Ja	Ja
	Erschließungskosten	Ja	Ja
	Zuschüsse	Ja	Ja
Darlehen	Laufzeit	Ja	Ja
	Zinssatz	Ja	Ja
Vergleich Heizarten	Aktuelle Preise Gas/ Strom	Ja	Ja
	Zukünftige Preise Gas/ Strom	Ja	Ja

Für einen Anschluss der Wärmepumpen an die Heizungsanlagen der Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel wird in der technischen Betrachtung davon ausgegangen, dass alle Heizungskessel im Kellergeschoss liegen. In der Realität liegen die Heizungen sowohl im Keller als auch im Dachgeschoss. Wegen dem Eigengewicht der Wärmepumpen und möglichen daraus resultierenden statischen Einschränkungen werden die Standorte der Heizungen nicht berücksichtigt.

Abhängig von dem Dämmungszustand und Sanierungszustand der Gebäude sind die nötigen Auswahlkriterien für die Wärmepumpen auszuwählen. Vor allem die Vorlauftemperatur ist von der Art der Sanierungsmaßnahmen abhängig. Die maximal zu leistenden Vorlauftemperaturen für die Wärmepumpen liegen sowohl bei der bivalenten, als auch in der monovalenten Betriebsweise bei 55 °C. Begründet liegt diese Annahme außerdem in den Nennleistungsangaben auf den Datenblättern der Wärmepumpen seitens der Hersteller für den höchsten Betriebspunkt bei 55 °C [Glaesmann, 2022].

Die Spreizung der Vorlauftemperatur zu der Rücklauftemperatur beträgt 10 K. Diese Temperaturanpassung gegenüber der aktuellen Heizungsart der Gebäude (mit Vorlauftemperaturen bei 70 °C und Rücklauftemperaturen bei 55 °C) liegt darin begründet, dass sowohl der COP, als auch der SCOP für eine maximale Spreizung von 10 K berechnet werden können. In der bivalenten Betriebsweise leistet der Kessel die Differenz zwischen der Vorlauftemperaturannahme mit 55 °C und der realen Temperatur von etwa 70 °C.

Des Weiteren sind bei der Aufstellung von Wärmepumpen im Stadtgebiet Schallgrenzwerte zu anderen Häusern und Grundstücken einzuhalten. Diese Werte werden in dieser Bachelorarbeit nicht ermittelt und als erfüllt angenommen. Dies liegt unter anderem daran, dass der Schallgrenzwert mit ausreichender Dämmung eingehalten werden kann, auch wenn das Gerät höhere Schallwerte emittiert.

Je nach Wärmepumpe unterscheiden sich die Wärmequellenarten und deren benötigter Abstand zu den Gebäuden. Für die Verbindung der Wärmepumpen mit den Wärmequellen, ausgenommen der Luft-Wärmepumpe, sind Rohrleitungen zwischen den Liegenschaften als Verteilsystem nötig. Je weiter die Wärmequellen von den Wärmepumpen entfernt sind, desto höher ist der Wärmeverlust in den Rohren [Hagedorn, 2019]. Innerhalb der technischen Analyse werden keine Übertragungsverluste zu den Wärmepumpen an die Umgebung und innerhalb der Heizungssystemanschlüsse betrachtet.

Die benötigte Heizleistung für die Deckung der Gebäudeheizlasten ist bei den Sole-Wärmepumpen und Wasser-Wärmepumpen ist von den Entzugsleistungen der Böden abhängig und damit von der vorliegenden Geologie und Hydrologie am Standort. Zudem ist der Betrieb einer Sole- oder Wasser- Wärmepumpe von der Boden- oder Grundwassertemperatur abhängig. Je höher diese sind, desto effizienter arbeitet diese Wärmepumpen. Außerdem ist die Effizienz der Wasser-Wärmepumpe von der Grundwasserbeschaffenheit abhängig. Bei zu hohen Konzentrationen bestimmter Stoffe im Grundwasser ist ein Zwischenkreislauf nötig. Mit dem zusätzlichen Kreislauf sinkt jedoch der COP-Wert. Die Boden- und Grundwassertemperaturen werden als konstant angenommen, da für den Standort Mathildenhöhe keine Temperaturdaten vorliegen. Orientiert wird sich bei den Temperaturen an durchschnittlichen Literaturangaben. Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers und geologische Daten liegen vor und werden in die Analyse mit einbezogen.

Weitere wichtige Faktoren bei der Auslegung einer Wärmepumpe sind die Netzleistung und die Denkmalschutzbestimmungen. Die Netzleistung am Standort liegt nicht vor und es wird angenommen, dass diese für einen monovalenten Betrieb ausreicht. Genauere Daten müssen

bei einer realen Auslegung analysiert werden. Da sich die Gebäude auf dem Gelände des Welt-erbes Mathildenhöhe befinden, sind strenge Vorschriften bezüglich baulicher Veränderungen zu beachten. Diese Einschränkungen haben Auswirkungen auf die verfügbare Fläche von Erdwärmquellen. Aus diesem Grund werden Denkmalschutzaspekte bei den Grundstücksflächen beachtet.

Für eine wirtschaftliche Bewertung werden unter Beachtung der technischen Grundlagen die relevantesten Einflussfaktoren aus der Tabelle 4 erläutert.

Bei den Investitionskosten bilden die Kosten der einzelnen Wärmepumpen, die Erschließungskosten und die Zuschüsse als Erträge den größten Anteil an der Gesamtinvestition und damit einen signifikanten Einfluss auf die Investitionssumme. Die Gesamtkosten der Wärmepumpen und Erschließungskosten sind dabei von den ausgesuchten Wärmepumpen, deren Anzahl in der parallelen Verschaltung und den nötigen Erschließungsflächen und Tiefen der Erdwärmquellen und damit von den Ergebnissen und Annahmen der technischen Analyse abhängig.

Bei den Zuschüssen durch den Bund wird sich auf die Förderliste aus dem Jahr 2023 bezogen (Stand 01.12.2023). Alle Wärmepumpen werden unter Beachtung der Bezuschussung durch den Bund ausgesucht. Während dieser Arbeit werden die Förderrichtlinien seitens der BAFA ab dem 01.01.2024 verändert. Da nicht absehbar ist, wann die neue Liste förderfähiger Wärmepumpen veröffentlicht wird, erfolgt der Bezug auf die Liste aus dem Jahr 2023. Innerhalb der Bundesförderung existiert ein Einkommensbonus, welcher jedoch nicht in der Analyse berücksichtigt wird, da keine Einkommensnachweise der Liegenschaften vorliegen. Zudem wird die Annahme getroffen, dass die maximalen Zuschüsse für den Aufbau eines Nahwärmenetzes für die Eigentümer der Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel beantragbar sind. Das Förderprogramm richtet sich eigentlich nur an Kommunen und Unternehmen. Die Städtischen und Hersteller-Zuschüsse werden in die Wirtschaftlichkeitsberechnung nur mit einbezogen, wenn die gewährleisteten Zuschüsse sich auf die verwendeten Wärmepumpen beziehen.

Für die Ermittlung der kapitalgebundenen Kosten wird exemplarisch ein Darlehen bei der KfW-Bank angenommen. Da keine Nachweise über Zinsvergünstigungen durch das Einkommen vorliegen, wird sich in der wirtschaftlichen Berechnung auf die Bedingungen des Kredits 359 bezogen. Eine Erläuterung des Kredits 359 erfolgt in Kapitel 6.2. Dabei wird die Laufzeit des Darlehens mit 10 Jahren definiert. Diese Annahme ist in der Zinsbindung von 10 Jahren begründet, denn ab einer Laufzeit größer als 10 Jahre gilt ab dem 11. Jahr der marktübliche Zins. Dieser lässt sich für die Zukunft nicht vorhersagen. Bei der Finanzierung wird von einer vollständigen Fremdfinanzierung über ein Annuitätendarlehen ohne eine Anzahlung ausgegangen.

Die aktuellen Stromkosten werden durch Bildung eines Mittelwertes von verfügbaren Stromtarifen für Wärmepumpen ermittelt. Grundlage für die Mittelwertbildung sind die günstigsten Tarife, die durch das Vergleichsportal Verivox bestimmt werden (Stand 18.03.2024). Obwohl die Höhe der Stromverbräuche für Wärmepumpen in den Gebäuden eher kleinen Industrieunternehmen entsprechen, wird als Eingabeparameter ein maximaler Stromverbrauch von 50.000 kWh/Jahr angenommen, da jährliche Stromverbräuche über diesem Grenzwert die Beantragung von Gewerbestromtarifen nötig machen (Verivox GmbH, 2024). Für Gewerbestromtarife sind weitere Schritte und Angaben nötig. Bei der Berechnung des Mittelwerts werden nicht alle verfügbaren Tarife einbezogen, da es ab einem Arbeitspreis von ca. 25 Cent einen Abstand von ca. 3 Cent zu den nächst höheren Tarifen gibt. Zudem werden die monatlichen Grundpreise nicht betrachtet. Wie in der Tabelle 5 zu sehen ist, sind die 3 höchsten Tarife in einem Intervall von 5 Cent verteilt. Es werden somit nur die Tarife berücksichtigt, die in dem Intervall von ca. 21 Cent bis ca. 25 Cent Arbeitspreis liegen. Von 10 ermittelten Tarifen sind dies

7 Tarife. Mit diesen Tarifen als Datengrundlage ergibt sich ein durchschnittlicher Strompreis von 23,88 Cent/kWh.

Zukünftige erwartete prozentuale Veränderungen des Strompreises sind in Tabelle 6 dargestellt. Ausgehend von dem ermittelten Strompreis werden mit den Preissenkungen die zukünftigen Strompreise bis zum Jahr 2035 berechnet. Der verwendete Bericht ist außerdem die Grundlage für die aktuellen und zukünftige Abschätzung der Gaskosten (Bongs et al., 2023). Es erfolgt die Annahme, dass die gemittelten Jahresverbräuche der einzelnen Gebäude in der Betrachtung der zwei Fälle Heizlast Aktuell und Heizlast nach Sanierung in den nächsten 10 Jahren konstant bleiben.

Tabelle 5 Aktuelle Strompreise für Wärmepumpen (Verivox GmbH, 2024)

#	Anbieter	Tarif	Arbeitspreis
1	Grünwelt Energie	Wärmestrom 12 Bonus	0,2282 €/kWh
2	EnBW	Grün und Sicher Privatstrom Wärmepumpe	0,2193 €/kWh
3	Grünwelt Energie	Wärmestrom Easy 12	0,2302 €/kWh
4	Saubere Energie	SAUBER STROM Wärmestrom	0,2451 €/kWh
5	GASPAR	GASPAR STROM Wärmepumpe	0,2440 €/kWh
6	Heizstromhoch3	Heizstromhoch3 Wärmepumpe	0,2500 €/kWh
7	Vattenfall	WP Natur 12	0,2547 €/kWh
8	R(H)EINPOWER	R(H)einpower Mein Strom Wärmepumpe 12	0,2836 €/kWh
9	ENTEKA	Entega Ökostrom Wärme	0,2968 €/kWh
10	EnivaM	enivaM Wärmepumpenstrom	0,3343 €/kWh
Mittelwert Anbieter 1 bis 7			0,2388 €/kWh

Tabelle 6 Erwartete zukünftige prozentuale Veränderung der Stromkosten für Wärmepumpen (Bongs et al., 2023)

Jahr	Kosten Gas	Kosten Strom	Veränderung Kosten Strom
2025	0,0900 €/kWh	0,2100 €/kWh	
2026	0,0950 €/kWh	0,2056 €/kWh	-2,10%
2027	0,0975 €/kWh	0,2012 €/kWh	-2,14%
2028	0,1050 €/kWh	0,1968 €/kWh	-2,19%
2029	0,1100 €/kWh	0,1924 €/kWh	-2,24%
2030	0,1150 €/kWh	0,1926 €/kWh	0,10%
2031	0,1167 €/kWh	0,1928 €/kWh	0,10%
2032	0,1182 €/kWh	0,1930 €/kWh	0,10%
2033	0,1200 €/kWh	0,1932 €/kWh	0,10%
2034	0,1213 €/kWh	0,1934 €/kWh	0,10%
2035	0,1225 €/kWh	0,1900 €/kWh	-1,76%
2040	0,1350 €/kWh	0,1900 €/kWh	0,00%
2045	0,1450 €/kWh	0,1900 €/kWh	0,00%
2050	0,1550 €/kWh	0,1900 €/kWh	0,00%

5 Auslegung der Wärmepumpensysteme

Im folgenden Kapitel werden die Wärmepumpen und die möglichen Wärmequellen dimensioniert. Dazu wird in drei Schritten vorgegangen. Zuerst wird die Heizlast der Gebäude bestimmt. Nach der Heizlastanalyse werden die geologischen und hydrologischen Bedingungen in Darmstadt einer exakten Betrachtung für eine Verwendung unterzogen. Anschließend werden mit den Rahmenbedingungen der technischen Analyse zuerst die Wärmepumpen (Luft, Sole, Wasser) ausgesucht und der COP-/SCOP-Wert berechnet. Als Schlusskapitel werden die möglichen Wärmequellen (Kollektoren, Sonden und Grundwasser) dimensioniert.

5.1 Heizlastanalyse der Gebäude heute

Im ersten Schritt werden die einzelnen Gebäudeheizlasten nach dem zweistufigen Verfahren von Hitchin & Hyde berechnet (Day, 2006). Für die Berechnung des Gesamtwärmeverlustkoeffizienten HLC werden für jedes Gebäude der Wärmebedarf, sowie die Gradtage für die Jahre, in denen die Wärmebedarfe gemessen wurden, bestimmt. Wie im Abschnitt 4.1 schon beschrieben, existieren je nach Gebäude, verschiedene gemessene Jahresbedarfswerte in unterschiedlichen Jahren. Um die Wärmeverlustkoeffizienten hinterher normiert miteinander vergleichen zu können, werden diese mit Hilfe der Gradtage witterungsbereinigt. Dies geschieht mit der Umstellung von Formel 7 nach der Variablen HLC

$$HLC = \frac{\dot{Q}_{HL}}{24 * GTZ}$$

Die Gradtage für die Jahre 2018-2022 für die Stadt Darmstadt werden mit Hilfe des Tools IWU Gradtagzahlen Deutschland ermittelt, siehe Tabelle 7. Mit den Gradtagen und den Wärmeverbrauchsdaten lassen sich die Wärmeverlustkoeffizienten der einzelnen Gebäude berechnen.

Im zweiten Verfahrensschritt werden die Heizlasten je Jahr nach Formel 6 kalkuliert. Die Norm-Innentemperatur ϑ_i beträgt 20 °C. Die Norm-Außentemperatur ϑ_a wird nach der DIN TS 12831-1 mit $\vartheta_a = -10$ °C definiert. Nach dieser Vorgehensweise ergeben sich die Heizungsleistungen für die Gebäude in den betrachteten Jahren. Aus diesen Leistungen kann abschließend ein Heizlastmittelwert für jedes Gebäude ermittelt werden, siehe Tabelle 9.

Energieversorgungsunternehmen haben zudem die Möglichkeit, bei zu hoher Netzbelastung durch Wärmepumpen die Spitzenlast zu reduzieren, indem Wärmepumpen abgeschaltet werden. Im Gegenzug bieten die Versorger vergünstigte Stromtarife für Wärmepumpen an. In der Literatur finden sich theoretische Sperrzeitenwerte zwischen 2 und 6 Stunden täglich. Dabei sind die Sperrzeiten in 2-Stunden Intervallen gefasst. Für jede Sperrdauer kann ein Sperrzeitfaktor berechnet werden (Glaesmann, 2022)

$$f_{Sperr} = \frac{24 h}{24 h - Sperrzeit [h]} \quad \text{Formel 28}$$

Da die Wärmepumpe die gesamte Tagesheizleistung bei einer möglichen Trennung vom Stromnetz in weniger Stunden bereitstellen muss, wird die Gebäudeheizlast mit dem Sperrfaktor multipliziert. In der Praxis sind die Sperrzeiten meist geringer, als in der Theorie. Dies liegt vor allem daran, dass alle Räume in einem Gebäude unterschiedliche Temperaturen, je nach Behaglichkeit der Mieter, aufweisen und somit nicht gleichzeitig mit derselben Wärmemenge beheizt werden müssen. Es ergeben sich somit nach Tabelle 8 geringere Sperrzeiten, als nach der Formel 28. (Glaesmann, 2022).

In Südhessen gelten für angeschlossene Wärmepumpen nach dem Netzbetreiber (e-netz Südhessen AG) die maximalen theoretischen Sperrzeiten von 3 · 2 Stunden pro Tag. Die e-netz

Südhessen AG gibt die Abschaltzeitpunkte nur ungenau mit morgens, mittags und abends in den Verträgen an (E-Netz Südhessen AG, 2024). In der folgenden Berechnung der Gesamtheizlast werden die realen verringerten Sperrzeitenfaktoren bei 3 · 2 Stunden verwendet. Dieser Sperrzuschlag wird mit den Gebäudeheizlasten multipliziert. Als Ergebnis ergibt sich die Gesamtgebäudeheizlast, welche in Tabelle 9 dargestellt ist.

Tabelle 7 Gradtagzahlen der Jahre 2018 – 2022 für Darmstadt (IWU, 2023)

Jahr	Gradtagzahl
2018	2984 K d
2019	3168 K d
2020	3017 K d
2021	3484 K d
2022	2994 K d

Tabelle 8 Reale Zuschlagsfaktoren für Sperrzeiten (Glaesmann 2022, S.130)

Sperrzeit	Zuschlagsfaktor f_{Sperr}
2 h	1,1
2 · 2 h	1,2
3 · 2 h	1,3

Tabelle 9 Gebäudeheizlasten

Adresse	Jahr	Q_{HL}	GTZ	HLC	Φ_{HL}	Φ_{HL}	Φ_{HL} mit f_{Sperr}
Fiedlerweg 24-34	2019	654.483 kWh	3168 K d	9 kW/K	258 kW	265 kW	297 kW
	2020	664.201 kWh	3017 K d	9 kW/K	275 kW		
	2021	726.898 kWh	3484 K d	9 kW/K	261 kW		
Lucasweg 6	2018	536.375 kWh	2984 K d	7 kW/K	225 kW	214 kW	240 kW
	2019	510.634 kWh	3168 K d	7 kW/K	201 kW		
	2021	601.757 kWh	3484 K d	7 kW/K	216 kW		
Dieburgerstraße 75	2018	709.857 kWh	2984 K d	10 kW/K	297 kW	285 kW	319 kW
	2019	708.203 kWh	3168 K d	9 kW/K	279 kW		
	2021	772.414 kWh	3484 K d	9 kW/K	277 kW		
Dieburgerstraße 85-87	2019	285.144 kWh	3168 K d	4 kW/K	113 kW	118 kW	132 kW
	2020	321.454 kWh	3017 K d	4 kW/K	133 kW		
	2021	298.196 kWh	3484 K d	4 kW/K	107 kW		
Hoetgerweg 10-12	2019	423.750 kWh	3168 K d	6 kW/K	167 kW	168 kW	189 kW
	2020	406.406 kWh	3017 K d	6 kW/K	168 kW		
	2021	473.459 kWh	3484 K d	6 kW/K	170 kW		
Summe						1049 kW	1175 kW

5.2 Heizlastanalyse der Gebäude nach Sanierung

Für die Berechnung der Heizlast nach den Sanierungsmaßnahmen wird dasselbe Verfahren nach Hitchin & Hyde (Day, 2006), wie in der aktuellen Heizlastberechnung, angewendet. Als Grundlage einer zukünftigen Wärmeverbrauchsreduktion erfolgt die Differenzberechnung des Gebäudeendenergiebedarfs auf die Effizienzklasse B, wie in Kapitel 4.2 begründet. Da die Wärmeverbräuche nur für die vergangenen Jahre existieren, werden diese Verbrauchsdaten um die ermittelten Prozentsätze reduziert. Zudem werden die ermittelten Gradtage in der Berechnung als Werte für die Zukunft nach den Sanierungsmaßnahmen genutzt, da es nicht möglich ist zukünftige Gradtage zu ermitteln. Mit den Energiewerten aus den Gebäudeeffizienzausweisen ergeben sich die prozentualen Reduktionen aus Tabelle 10.

Mit diesen Werten kann die nötige Reduktion der Verbräuche berechnet werden. Aus den Verbräuchen ergeben sich nach dem Verfahren von Hitchin & Hyde die Heizlasten nach Sanierungsmaßnahmen auf die Effizienzstufe B (Day, 2006).

Tabelle 10 Nötige Energieverbrauchsreduktion bei Umstellung auf Effizienzklasse B

Gebäude	Endenergieverbrauch in 2023	Effizienzklasse B	Reduktion
Fiedlerweg 24-34	159 kWh/m ²	75 kWh/m ²	-53 %
Lucasweg 6	192 kWh/m ²	75 kWh/m ²	-61 %
Dieburgerstr 75	218 kWh/m ²	75 kWh/m ²	-66 %
Dieburgerstr 85-87	126 kWh/m ²	75 kWh/m ²	-40 %
Hoetgerweg 10-12	126 kWh/m ²	75 kWh/m ²	-40 %

Tabelle 11 Gebäudeheizlasten nach Sanierung.

Adresse	Jahr	\dot{Q}_{HL}	GTZ	HLC	Φ_{HL}	Φ_{HL}	Φ_{HL} mit f_{Sperr}
Fiedlerweg 24-34	2019	308.718 kWh	3168 K d	4 kW/K	122 kW	125 kW	140 kW
	2020	313.302 kWh	3017 K d	4 kW/K	130 kW		
	2021	342.876 kWh	3484 K d	4 kW/K	123 kW		
Lucasweg 6	2018	210.069 kWh	2984 K d	3 kW/K	88 kW	84 kW	94 kW
	2019	199.987 kWh	3168 K d	3 kW/K	79 kW		
	2021	235.675 kWh	3484 K d	3 kW/K	85 kW		
Dieburgerstraße 75	2018	243.993 kWh	2984 K d	3 kW/K	102 kW	98 kW	110 kW
	2019	243.424 kWh	3168 K d	3 kW/K	96 kW		
	2021	265.495 kWh	3484 K d	3 kW/K	95 kW		
Dieburgerstraße 85-87	2019	170.405 kWh	3168 K d	2 kW/K	67 kW	70 kW	79 kW
	2020	192.104 kWh	3017 K d	3 kW/K	80 kW		
	2021	178.205 kWh	3484 K d	2 kW/K	64 kW		
Hoetgerweg 10-12	2019	253.237 kWh	3168 K d	3 kW/K	100 kW	101 kW	113 kW
	2020	242.872 kWh	3017 K d	3 kW/K	101 kW		
	2021	282.944 kWh	3484 K d	3 kW/K	102 kW		
Summe						477 kW	535 kW

5.3 Analyse der Geologie und der Hydrologie

Zuerst wird in diesem Kapitel die Geologie und anschließend die Hydrologie an der Mathildenhöhe betrachtet. Für die anschließende Auslegung der Kollektoren und Sonden folgt die Analyse und Beschreibung der Bodenart und Wärmeleitfähigkeiten des Bodens. Im zweiten Abschnitt werden die zu beachtende Grenzwerte bei Nutzung des Grundwassers allgemein und speziell von Seiten des Herstellers AERMEC für die exemplarisch ausgewählte Wasser-Wärmepumpe ermittelt.

Für eine Dimensionierung der Erdkollektoren oder Erdsonden werden geologische Daten des Untergrunds benötigt. Bei der Förderung von Grundwasser ist die Tiefenlage des Grundwasserreservoirs und die Konzentration der Wasserinhaltsstoffe ausschlaggebend.

Die Entzugsleistung der Kollektoren und Erdsonden hängen von der Bodentiefe und der Bodenart ab. Diese beiden Faktoren werden wiederum von der Klimazone innerhalb Deutschlands beeinflusst. Nach der Einteilung der Klimazonen durch die VDI 4640-2 befindet sich Darmstadt in der Klimazone 8a. Bei den Bodenarten der Oberflächenkollektoren wird in der VDI zwischen Sand, Lehm, Schluff und Sandiger Ton unterschieden. Nach der Geologie-Karte der HLNUG (2024) liegt die Mathildenhöhe und damit die zu betrachtende Gebäude in dem Strukturraum Bergsträßer Odenwald, welches zu dem Geologischen Gebiet Kristalliner Odenwald (Siehe Abbildung 10) zuzuordnen ist. Der Kristalline Odenwald besteht aus magmatischen Gesteinsarten, hauptsächlich Granite, Diorite und Gabbros. Nach Kempe ist die oberflächliche Geologie an der Mathildenhöhe hauptsächlich durch die Gesteinsart Granodiorit, eine Unterart der Granite bestimmt. Der Granodiorit in Darmstadt setzt sich aus verschiedenen Mineralien mit unterschiedlichen Korngrößen zusammen. Diese liegen zwischen 1 und 3 mm Durchmesser (Kempe et al. 2009). Nach Meike Beier ergibt sich als Einordnung in die VDI ein schluffiger bis sandiger- Kies (Beier, 2007). Bei der oberflächennahen Geothermie und der Tiefengeothermie ist vor allem auf die Eignung des Untergrunds als Wärmequelle zu achten. So ist auf den geologischen Karten der HLNUG eine gute hydrogeologische Eignung in dem Gebiet der Mathildenhöhe ersichtlich, siehe Abbildung 11.

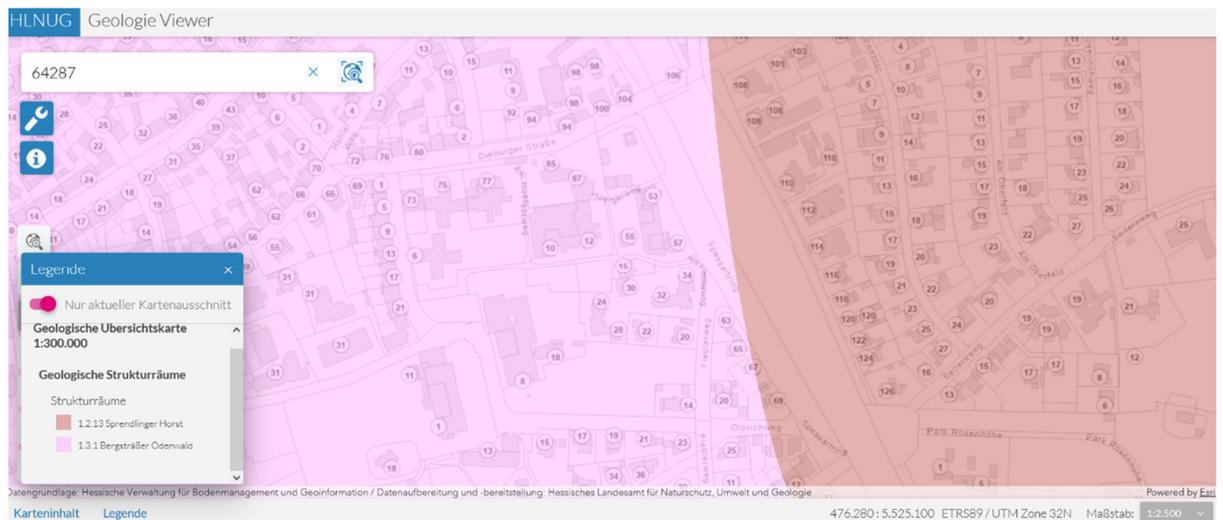


Abbildung 10 Geologische Strukturräume des Mathildenhügel (HLNUG, 2024)

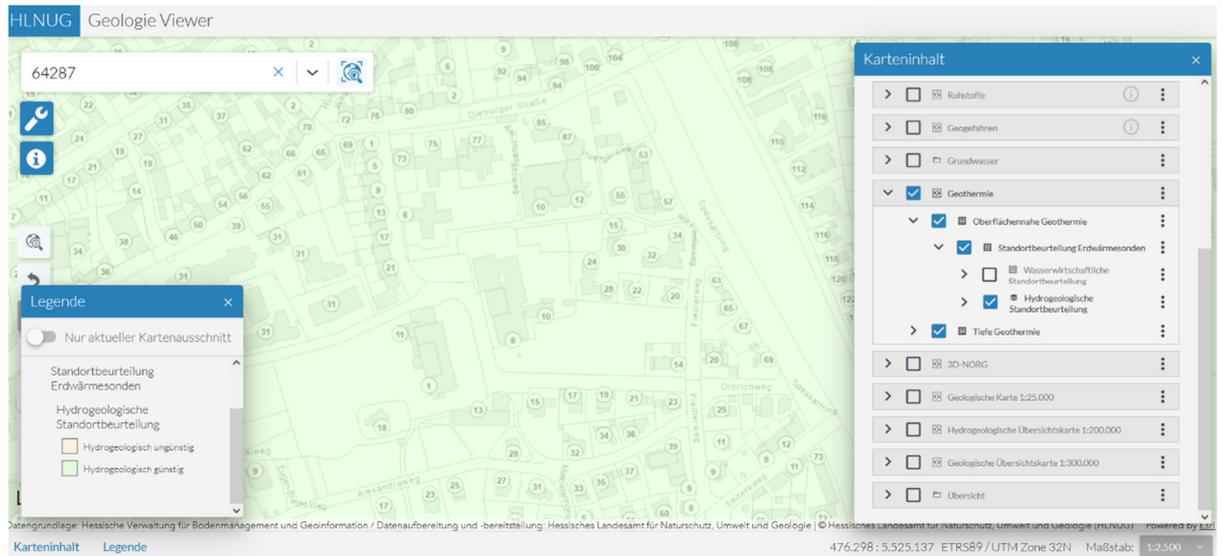


Abbildung 11 Hydrologische Eignung des Mathildenhügels (HLNUG, 2024)

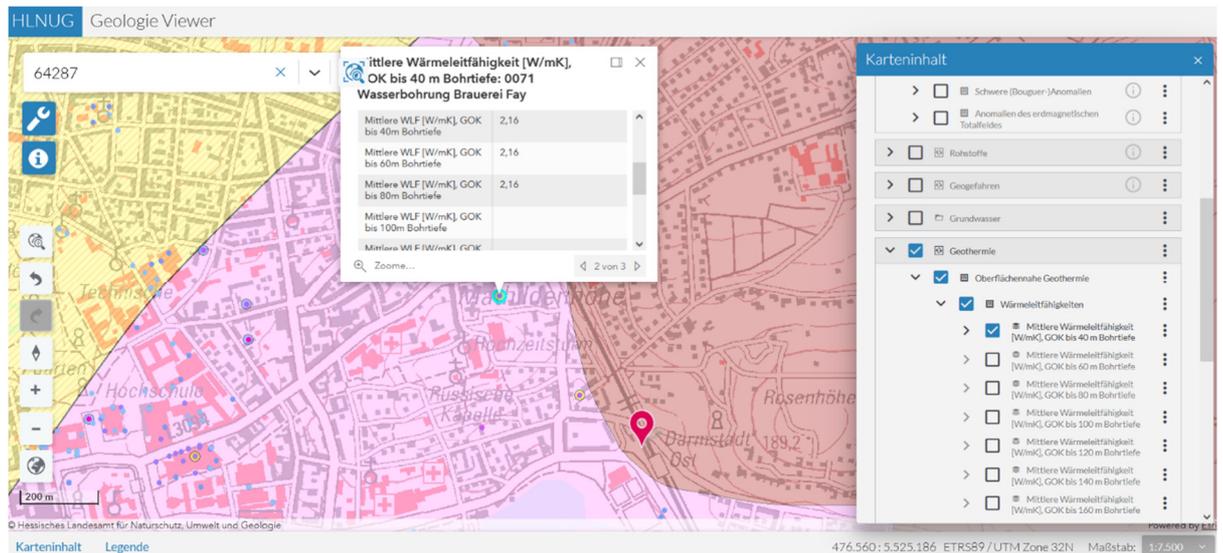


Abbildung 12 Wärmeleitfähigkeiten des Bodens des Mathildenhügels (HLNUG, 2024)

Innerhalb der VDI 4640-2 werden für die Auslegung von Erdsonden die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes benötigt. Diese lässt sich auch mit Hilfe des Geologie Viewers des HLNUG bestimmen, siehe Abbildung 12.

Auf den Grundstücken der Gebäude liegt eine Probebohrung auf dem Gelände der ehemaligen Brauerei Fay mit einer Tiefe von 82 m. Für die Bohrung sind in 20 m-Intervallen bis 60 m Tiefe die mittleren Wärmeleitfähigkeiten angegeben. Nach Abbildung 12 ergibt sich ein durchschnittlicher Wärmeleitwert von $2,16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (HLNUG, 2024).

Bei der direkten Nutzung des Grundwassers für einen langfristigen und wirtschaftlichen Betrieb sind bestimmte ökologische Bedingungen einzuhalten. Je nach Qualität des Grundwassers, bzw. Konzentration bestimmter Inhaltstoffe besteht die Gefahr von Korrosion des Wärmetauschers der Wärmepumpe oder eine Verockerung der Brunnenrohre. Um eine Korrosion am Wärmetauscher oder Verockerung bei der direkten Grundwassernutzung zu vermeiden, sind bestimmte Konzentrationshöchstgrenzen bei dem zu fördernden Grundwasser einzuhalten, siehe Tabelle 12.

Liegen die Konzentrationen von Mangan und Eisen im Grundwasser höher als die Grenzwerte, so ist ein Einbau einer Wasser-Wärmepumpe unwirtschaftlich. Der Hersteller AERMEC gibt für die ausgesuchte Wasser-Wärmepumpe Konzentrationen im Grundwasser an, für welche der verbaute Platten-Wärmetauscher noch eine direkte Nutzung des Grundwassers zulässt (Bierschbach, 2024), siehe Tabelle 13.

Liegen die Grenzwerte höher, so kann direkte Korrosion am Wärmetauscher mit einem Zwischenkreislauf vermieden werden (Bonin, 2018). Zudem wird das Risiko der Vereisung des Wärmetauschers durch Ablagerungen von nicht herausgefilterten Sanden verringert. Nach der Inbetriebnahme mit direkter Grundwassernutzung kann sich die Konzentration der Elemente im Wasser durch dauerhafte Wasserentnahme verändern. Der Wartungsaufwand ist mit der Kontrolle der Wasserqualität explizit höher als bei Erdsonden (Hartmann, 2006).

Durch die Trennung von Grundwasser und Wasser-Wärmepumpen-Kreislauf reduziert sich der Gesamtwirkungsgrad um ca. 4 % (Bonin und E. V., 2018). Der Hersteller AERMEC gibt bei Systemtrennung einen Übertragungsverlust von ca. 2 K an. Der COP sinkt in der Praxis um ca. 0,2 bis 0,4 (Bierschbach, 2024).

Tabelle 12 Konzentrationshöchstgrenzen des Grundwassers für Wasser-Wärmepumpen (Hartmann, 2006, S.229)

Inhaltsstoff	Grenzwert	Risikobemerkung
Eisen	< 2 mg/l	Verockerung Schluckbrunnen
Mangan	< 1 mg/l	Verockerung Schluckbrunnen
Aluminium	< 0,2 mg/l	Korrosion von Kupfer
Ammoniak	< 2 mg/l	Korrosion von Kupfer

Tabelle 13 Konzentrationsgrenzen für die direkte Nutzung von Grundwasser in Wasser-Wärmepumpen (AERMEC GmbH, 2024)

Wasserinhaltsstoff / Kennwert	Edelstahl Platten-WT
pH-Wert	7,5-9
Phosphate	< 2 ppm
Mangan	< 0,05 ppm
Eisen	< 0,2 ppm
Hydrogenkarbonat	< 300 ppm
Chlor-Ionen	< 50 ppm
Sulfat	< 50 ppm

5.4 Auslegungen der Wärmepumpen

In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Wärmepumpen nach den technischen Randbedingungen ausgelegt. Im ersten Unterkapitel erfolgt die Beschreibung der Wärmepumpen-Auslegung als graphische oder rechnerische Variante. Im Anschluss erfolgen die technischen Auslegungen der Luft-, Sole- und Wasser-Wärmepumpen, sowie die Berechnungen der SCOP-Werte.

5.4.1 Allgemeines graphisches und rechnerisches Vorgehen

Für die optimale Leistungswahl einer Wärmepumpe kann die Auslegung sowohl graphisch, als auch rechnerisch ermittelt werden. Bei der graphischen Varianten wird zwischen den Betriebsarten monovalent und bivalent unterschieden. Im Folgenden wird näher auf die graphische Ermittlung eingegangen. Als erster Schritt wird ein Diagramm erstellt, das die Heizlast (Y-Achse) über der Außentemperatur (X-Achse) darstellt.

Die Außentemperatur liegt in dem Intervall zwischen der Norm-Außentemperatur und der Heizgrenztemperatur. Die Intervallgrenzen der Leistung liegen zwischen 0 kW und dem Wert oberhalb der jeweiligen Liegenschaftsheizlast bei Norm-Außentemperatur. In den Diagrammen ist die Leistung der Wärmepumpe je nach Außentemperatur als Graph eingetragen. Diese Diagramme werden auch als Leistungsdiagramm bezeichnet und werden von einigen Herstellern in den Planungshandbüchern der Wärmepumpe angegeben. Existieren keine Leistungsdiagramme, so werden die Graphen je nach Wärmepumpenart eingezeichnet. Diese Einzeichnung ist nur bei Sole- und Wasser-Wärmepumpe möglich. Dies ist darin begründet, dass die Erdwärmequelle ganzjährig konstante Temperaturen ausweisen und damit bei den Sole- und Wasser-Wärmepumpen eine konstante Leistungsabgabe über das Jahr angenommen werden kann. Der Graph besteht dann aus einer horizontalen Linie.

Bei Luft-Wärmepumpen ändert sich die Leistung je nach Außentemperatur. Leistungsdiagramme sind für die Auslegung dieser Wärmepumpenart essenziell. In einem weiteren Schritt werden in diese Diagramme die benötigten Gebäudeheizlasten als lineare Gerade aufgetragen. Diese Lastgerade beginnt im Punkt (Norm-Außentemperatur / maximale Heizlast) und endet im Punkt (Heizgrenztemperatur / 0 kW).

Die rechnerische Ermittlung des Bivalenzpunktes erfolgt über die Verwendung der Gebäudeheizkurvenvorlauftemperatur, sowie der Wärmepumpenvorlauftemperatur, siehe Kapitel 5.4.2. Nach graphischer Bestimmung des Bivalenzpunktes kann die benötigte Heizlast in dem Punkt nach Formel 15 berechnet werden.

Bei der monovalenten Betriebsweise erfolgt die Auslegung der Wärmepumpe durch die Norm-Außentemperatur der zu betrachtende Region. Die bei dieser Temperatur erforderliche Gebäudeheizlast ist durch die Wärmepumpe mindestens zu decken. Eine Überdimensionierung der Wärmepumpenleistungen ist wegen möglicher kälterer Temperaturen als die Norm-Außentemperatur in der praktischen Anwendung vorgeschlagen (Glaesmann, 2022).

5.4.2 Luft-Wärmepumpe

In diesem Kapitel werden die Luft-Wärmepumpen für einen bestimmten Bivalenzpunkt ausgelegt. Die Auslegung erfolgt über die maximal zu leistende Vorlauftemperatur von 55 °C mit Hilfe einer Heizkurve.

Daran anschließend werden die nötigen Leistungen für die Deckung der Heizlasten im Bivalenzpunkt bestimmt. Als folgende Schritt erfolgen die Auslegung der parallel verschalteten Wärmepumpen und des Kessels, sowie der Berechnung des COP und des SCOP-Wertes der Wärmepumpen.

Als Luft-Wärmepumpe werden exemplarisch Produkte des Herstellers Stiebel Eltron genutzt, da für Luft-Wärmepumpen des Herstellers die Leistungsdiagramme in den Planungshandbüchern vorliegen. Es wird sich für die Luft-Wärmepumpe mit der größten möglichen Heizleistung entschieden. Das aktuell leistungsstärkste verfügbare Modell ist die WPL S 47 HK 400 Premium, die für den Einsatz in Gewerbebetrieben und Mehrfamilienhäusern dimensioniert wurde. Das Modell ist als Außensplit-Wärmepumpe erhältlich. Die Außeneinheit beinhaltet nur

die Ventilatoren zum Ansaugen der Umgebungsluft. Verdampfer und Verdichter sind in der Inneneinheit eingebaut. Somit ist ein schallemissionsarmer Betrieb möglich. Für den Betrieb bei Temperaturen unter 0 °C am Verdampfer erfolgt das Abtauen des gefrorenen Wassers durch eine zeitweise Kreislaufumkehrung, siehe Kapitel 2.2. Als Kältemittel wird aktuell das synthetische R410A eingesetzt (Stiebel Eltron GmbH & Co. KG, 2024).

Für die Ermittlung des Bivalenzpunktes wird ein Heizkurvendiagramm mit zwei Geraden, eine für die Vorlauftemperatur und eine für die Rücklauftemperatur über die Außentemperatur aufgetragen. Gemäß den Annahmen für die Vor- und Rücklauftemperatur im Kapitel 4.2 folgt die Abbildung 13.

Bei der Vorlauftemperatur von 55 °C wird der Schnittpunkt mit der Heizungsvorlauftemperatur gebildet. Die X-Koordinate des Schnittpunktes ergibt die Temperatur des Bivalenzpunktes (hier bei -1°C), an welchem der zweite Wärmeerzeuger zugeschaltet wird. Daran anschließend können die für jedes Gebäude nötigen Leistungen nach Formel 15 ermittelt werden.

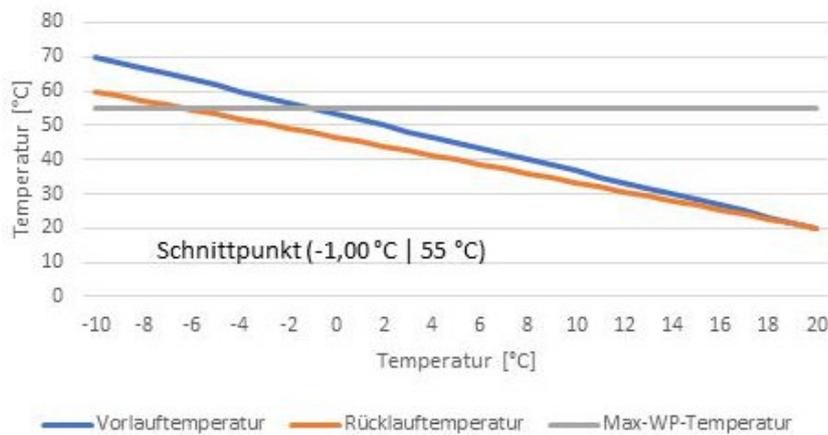


Abbildung 13 Heizkurve Gebäude und Luft-Wärmepumpe

Mit den berechneten Heizlasten am Bivalenzpunkt kann die Anzahl der Luft-Wärmepumpen in dem Bivalenzpunkt für die jeweiligen Gebäude bestimmt werden. Für die Ermittlung der Anzahl werden die einzelnen Gebäudeheizlasten am Dimensionierungspunkt durch die Nennleistung bei der Bivalenztemperatur (-1°C) dividiert.

Tabelle 14 Heizleistung der Luft-Wärmepumpe am Bivalenzpunkt, Anzahl der Luft-Wärmepumpen an Bivalenzpunkt, sowie Leistungsanteil, Deckungsgrad und Jahresarbeitszahl

Gebäudeadresse	Heizleistung Bivalenzpunkt	Anzahl der Wärmepumpen	Leistungsanteil	Deckungsgrad	$SCOP_{WPA}$
Fiedlerweg 24-34	190 kW	3,8	45,87 %	0,95	2,78
Lucasweg 6	153 kW	3,07	42,55 %	0,93	2,68
Dieburgerstraße 75	204 kW	4,08	42,66 %	0,93	2,68
Dieburgerstraße 85-87	84 kW	1,69	51,65 %	0,97	2,89
Hoetgerweg 10-12	121 kW	2,42	54,05 %	0,975	2,92

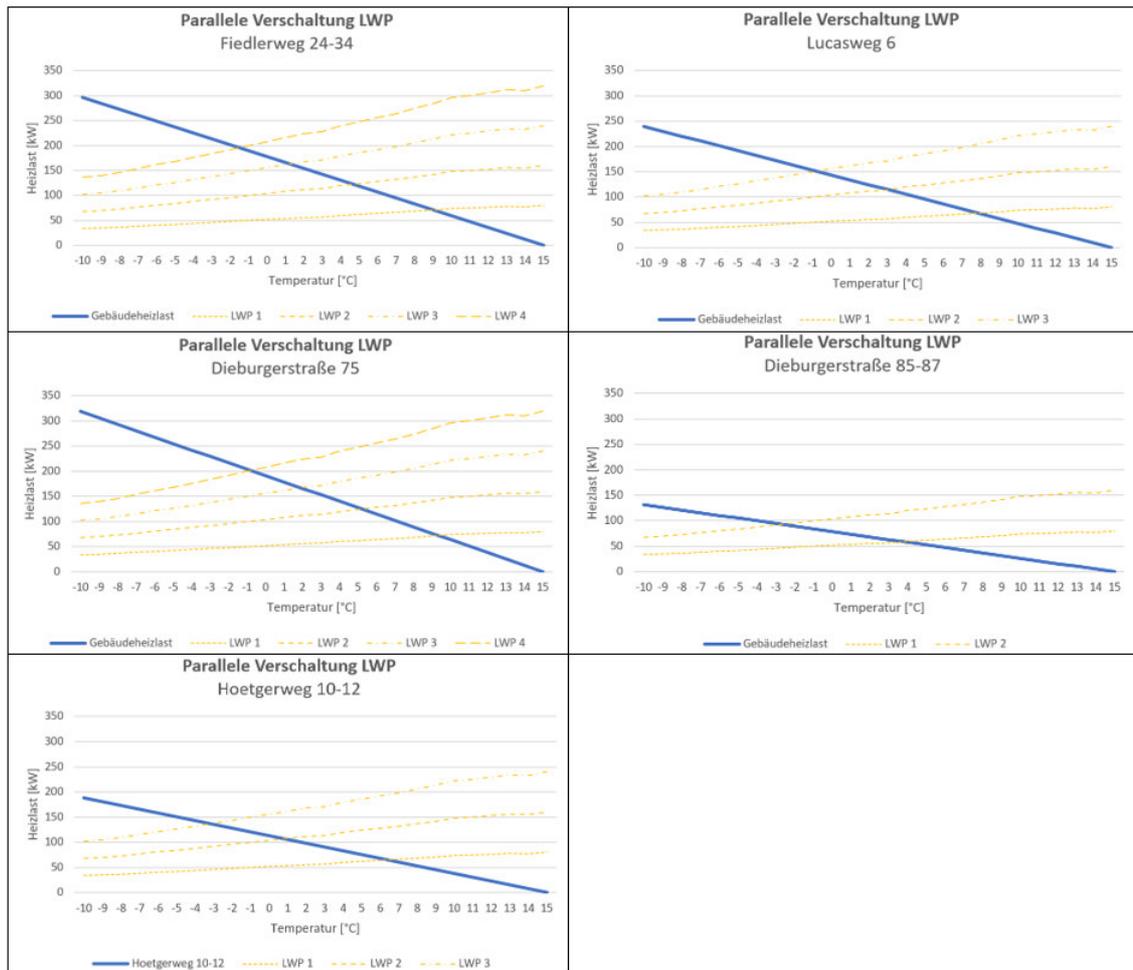


Abbildung 14 Parallele Verschaltung von Luft-Wärmepumpen (LWP)

Die berechneten Anzahlen werden auf die Werte 2, 3 und 4 gerundet. Innerhalb der benötigten Anzahl erfolgt eine leichte Über-/ Unterdimensionierung der Wärmepumpen mit Ausnahme des Gebäudes Dieburgerstraße 85+87 und Hoetgerweg 10-12. In diesen beiden Liegenschaften wird eine Überdimensionierung zwecks der Wirtschaftlichkeit vorgenommen. Die Luft-Wärmepumpen werden parallel zusammengeschaltet. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 14.

Die COPs für die unterschiedlichen Betriebspunkte werden über die Datenblätter von Stiebel Eltron ermittelt. Von den COP-Werten wird nach Formel 9 der Faktor 0,3 abgezogen, da die Luft-Wärmepumpe des Herstellers Stiebel Eltron für tiefe Temperaturen eine Kreislaufumkehrabtauung nutzt. Für die Vorlauftemperaturkorrektur $F_{\Delta T}$ von 35 °C auf 55 °C bei einer angenommenen Temperaturspreizung von 10 K wird der Korrekturfaktor über die Tabellen in der VDI 4650 angepasst. Die Temperaturdifferenzen in der Berechnung des COP-Wertes nach der DIN EN 14511-2 beträgt 5 K. Da die ausgesuchte Wärmepumpe von Stiebel-Eltron als Fixed-Speed-Wärmepumpe ausgeführt ist, erfolgt die Auswahl der $F_{T1} - F_{T3}$ Faktoren bei einer Heizgrenztemperatur von 15 °C.

$$SCOP_{WP} = \frac{1,051}{\frac{0,032}{2,9-0,3} + \frac{0,616}{3,6-0,3} + \frac{0,532}{4-0,3}} = 3,07$$

Für die Berechnung des SCOP-Wertes der bivalenten Wärmepumpenanlage ist zusätzlich der Deckungsanteil zu beachten, welcher in der bivalenten Betriebsweise geringer als 100 % ist. In der VDI 4650 wird der Deckungsanteil in der bivalent parallelen und alternativen Betriebsweise über den Leistungsanteil bei Norm-Außentemperatur berechnet. Der Leistungsanteil

der einzelnen parallel verschalteten Wärmepumpen in den Gebäuden an der Gesamtheizlast wird, wie in der Methodik beschrieben, berechnet, siehe Tabelle 14.

Über die Tabellen der VDI 4650 werden die berechneten Leistungsanteile auf 5 % Genauigkeit auf- oder abgerundet und die Deckungsgrade bei einer parallel bivalenten Betriebsweise ermittelt. Nach Formel 13 ergeben sich damit die $SCOP_{WPA}$ -Werte aus Tabelle 14.

5.4.3 Sole-Wärmepumpe

In diesem Kapitel wird zuerst die Entscheidungsfindung basierend auf der Sole-Wärmepumpen-Serie Logatherm des Herstellers Buderus beschrieben. Nach der Auswahl einer passenden Wärmepumpe wird diese in monovalenter parallel verschalteter Betriebsweise für die einzelnen Gebäudeheizlasten bei Norm-Außentemperatur ausgelegt. Zudem wird der SCOP-Wert der Wärmepumpenanlage über den COP-Wert berechnet.

Für den Anschluss von Erdkollektoren und Erdsonden als Wärmequelle wird eine Sole-Wärmepumpe benötigt. Als Hersteller wird Buderus gewählt, da dieser Sole-Wärmepumpen mit großen Heizleistungen produziert. Die Serie Logatherm WPS.2 HT wurde speziell für die Modernisierung von Mehrfamilienhäusern und Gewerbeimmobilien entwickelt. Wie in der Luft-Wärmepumpe von Stiebel Eltron wird R410A als Kältemittel eingesetzt. Ein weiterer Entscheidungsgrund für diese Serie ist mögliche Nutzung eines elektrischen Heizers von bis zu 15 kW. Durch die Nutzung des elektrischen Heizstabs ist eine geringe Unterdimensionierung der Sole-Wärmepumpe möglich. Andernfalls müsste für eine geringe Heizleistung eine zusätzliche Wärmepumpe angeschafft werden. Dies ist aus ökonomischen Gründen nicht empfehlenswert. Die Serie ist verfügbar in acht verschiedenen Leistungsstufen (22 kW, 28 kW, 38 kW, 48 kW, 64 kW, 72 kW und 80 kW). Wegen den hohen benötigten Heizlasten der Gebäude werden nur die Leistungsstufen 48 kW, 54 kW, 64 kW und 72 kW in die Auswahl einbezogen. Die Nennwärmeleistung bei 55 °C Vorlauftemperatur wird über die Herstellerdatenblätter ermittelt, siehe Tabelle 15.

Wie in der Methodik im Kapitel 4 dargestellt, werden für die Auswahl der Wärmepumpe mit einer bestimmten Nennleistung, die Gebäudeheizlasten durch die Nennleistungen der Wärmepumpen geteilt. Es ergibt sich die Anzahl der benötigten Wärmepumpen. Die Wärmepumpen-Leistungsstufe, welche für die einzelnen Gebäude am nächsten an einem ganzzahligen Vielfachen liegt, wird für die Auslegung genutzt.

Tabelle 15 Nennleistungen Sole-Wärmepumpen bei 55 °C Vorlauftemperatur (Buderus Thermotechnik GmbH, 2024, S. 7)

Wärmepumpen Buderus	Nennwärmeleistung
Logatherm WPS HT-48	47 kW
Logatherm WPS HT-54	54 kW
Logatherm WPS HT-64	63 kW
Logatherm WPS HT-72	71 kW

Es ergibt sich aus der Tabelle 16, dass die WPS HT-48 und die WPS HT-54 in der ermittelten Anzahl nah bei einander liegen. Bei Verwendung der WPS HT-48 werden die Anzahl der Wärmepumpen bei der Dieburgerstraße 85-87 und Hoetgerweg 10-12 überdimensioniert und bei der Dieburgerstraße 75 unterdimensioniert. Wird die WPS HT-54 ausgewählt, so werden die Anzahl der Sole-Wärmepumpen bei allen Gebäuden, ohne den Gebäuden am Hoetgerweg 10-12 und der Dieburgerstraße 75, überdimensioniert. Da für die WPS HT-48 im Gegensatz zu der

WPS HT-54 Listenpreise des Herstellers vorliegen, wird die WPS HT-48 ausgewählt und in der folgenden Dimensionierung als Grundlage eingesetzt.

Eine Verschaltung mehrerer Sole-Wärmepumpen wird monovalent ausgelegt. Für die Auslegung werden in den Heizlastdiagrammen der einzelnen Gebäude die Nennleistungen der Sole-Wärmepumpen gemäß der ermittelten Geräteanzahl von 2 und 3 aufsummiert und je Nennleistung parallel für die Deckung der einzelnen Gebäudeheizlasten zusammengeschaltet (siehe Abbildung 15).

Tabelle 16 Ermittlung der passenden Sole-Wärmepumpe

Gebäudeadresse	Φ_{HL} mit f_{Sperr}	HT-48	HT-54	HT-64	HT-72
Fiedlerweg 24-34	140 kW	2,98	2,59	2,22	1,97
Lucasweg 6	94 kW	2,00	1,74	1,49	1,32
Dieburgerstraße 75	110 kW	2,33	2,03	1,74	1,54
Dieburgerstraße 85-87	79 kW	1,67	1,46	1,25	1,11
Hoetgerweg 10-12	113 kW	2,40	2,09	1,79	1,59
Summe	535 kW	11,38	9,90	8,49	7,53

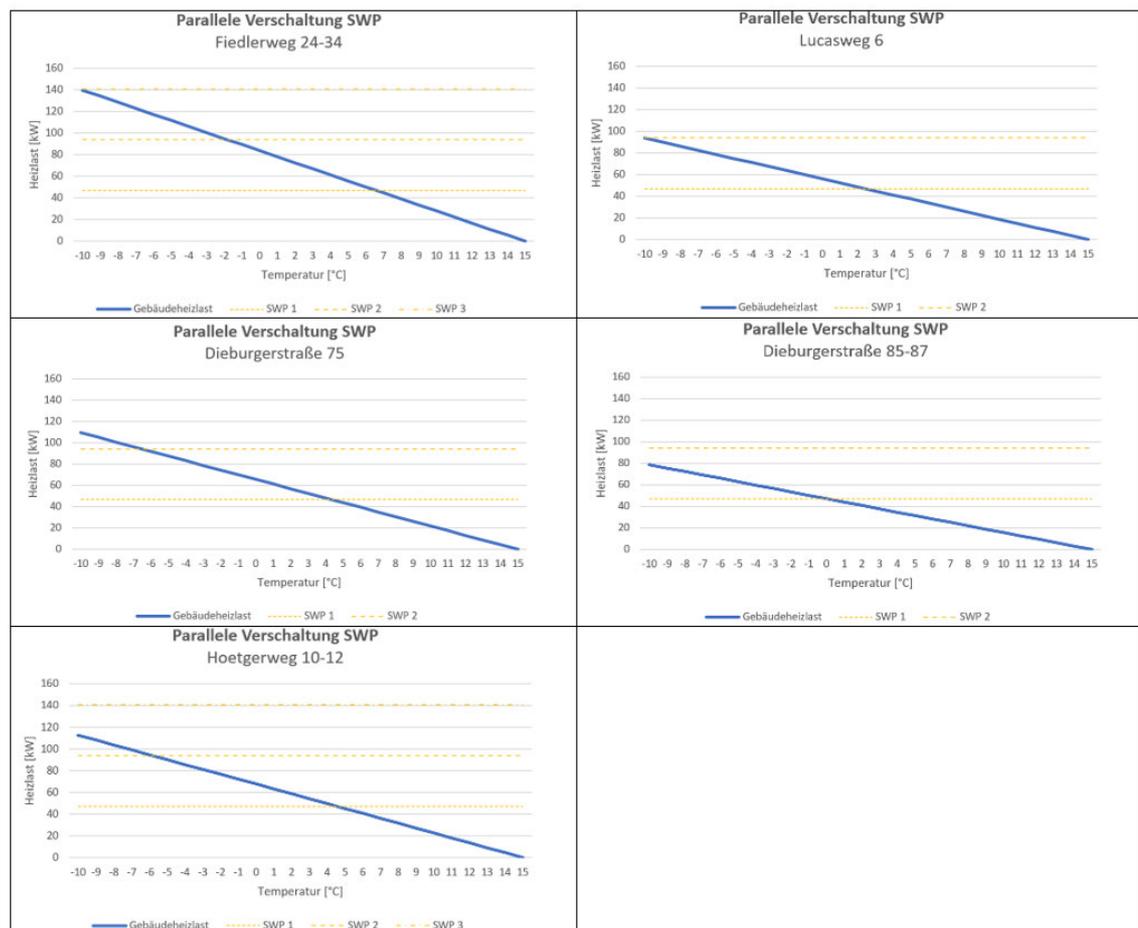


Abbildung 15 Parallele Verkettung der Sole-Wärmepumpen (SWP)

Bei der Berechnung der Sole-Wärmepumpen wird der COP-Wert aus den Datenblättern von Buderus ermittelt. Die Berechnung des SCOP-Wertes erfolgt mit Hilfe der Gleichung 11. Wie bei der Luft-Wärmepumpe wird über die Tabellen der VDI 4650 der Korrekturfaktor für die

abweichende Temperaturdifferenz am Verflüssiger übernommen. Die Vorlauftemperaturkorrektur wird nach Tabelle 3 der VDI 4650 bei einer Quellentemperatur von 0 °C ermittelt. Für die Vorplanung der Wärmequellenpumpe kann der Wert $F_p = 1,035$ eingesetzt werden. Es ergeben sich zwei Ergebnisse, da bei der Unterdimensionierung des Gebäudes Dieburgerstraße 75 an kalten Tagen der Heizstab eingesetzt werden muss. Die Ermittlung der Leistungsanteile, Deckungsgrade, sowie SCOP-Werte der Anlage erfolgt äquivalent zu den Bedingungen und Vorgehensweise wie bei der Berechnung der Luft-Wärmepumpe.

Tabelle 17 Leistungsanteile, Deckungsgrade, SCOP-Werte der Sole-Wärmepumpen.

Heizstab	$SCOP_{WP}$	Leistungsanteil	Deckungsgrad	$SCOP_{WPA}$
Ohne	4,06	100 %	1	4,06
Mit	4,06	85,45 %	0,995	3,98

5.4.4 Wasser-Wärmepumpe

Bei der Dimensionierung der Wasser-Wärmepumpe erfolgt die Auslegung analog zu der Sole-Wärmepumpe. Anders als der Hersteller Buderus produziert der Hersteller AERMEC Wasser-Wärmepumpen für Wohnhausanlagen, Hotels und den Industriesektor. Die resultierenden Anforderungen, wie hohe Heizleistungen, analog zu der Sole-Wärmepumpe werden von der WWB-Serie erfüllt. Diese Serie ist in acht verschiedenen Leistungsstufen verfügbar. Im Gegensatz zu den Sole-Wärmepumpen von Buderus haben die Wasser-Wärmepumpen keinen Heizstab als Zubehör eingebaut. Als Kältemittel wird R134a verwendet (AERMEC S. p. A., 2024). Auch bei dem Hersteller AERMEC werden nur bestimmte Leistungsstufen in die Analyse einbezogen (0350-0900-Serie). Die Nennwärmeleistungen sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18 Nennleistung Wasser-Wärmepumpen bei 55 °C Vorlauftemperatur (AERMEC S. p. A., 2024, S.3.f)

Wärmepumpe	Nennwärmeleistung
WWB 0350	47,3 kW
WWB 0550	58,1 kW
WWB 0600	72,9 kW
WWB 0700	92,2 kW

Die Ermittlung der zu analysierenden Wasser-Wärmepumpe erfolgt analog zu der Vorgehensweise der Sole-Wärmepumpe. Ausgehend von den ermittelten Werten in der Tabelle 19 ergibt sich die Auswahl der WWB 0350, da bei den Anzahlen der Wasser-Wärmepumpen für die Heizlast nur eine geringe Unterdimensionierung für zwei Gebäude nötig ist, im Gegensatz zu den anderen Möglichkeiten. Eine Überdimensionierung ist bei den Gebäuden der Dieburgerstraße 75, Dieburgerstraße 85-87 und dem Hoetgerweg 10-12 zwingend notwendig. Begründet liegen die Überdimensionierungen auch in dem Faktor, dass kein Heizstab vorhanden ist, um eine Unterdimensionierung auszugleichen. Mit den ermittelten Anzahlen der WWB 0350 werden die Wärmepumpen parallel miteinander verschaltet, um die Heizlasten der Gebäude bei Norm-Außentemperatur monovalent decken zu können.

Tabelle 19 Ermittlung der passenden Wasser-Wärmepumpe

Adresse	Φ_{HL} mit f_{Sperr}	0350	0550	0600	0700
Fiedlerweg 24-34	140 kW	2,96	2,41	1,92	1,52
Lucasweg 6	94 kW	1,98	1,62	1,29	1,02
Dieburgerstraße 75	110 kW	2,32	1,50	1,50	1,19
Dieburgerstraße 85-87	79 kW	1,66	1,35	1,08	0,85
Hoetgerweg 10-12	113 kW	2,38	1,94	1,55	1,22
Summe	535 kW	11,31	9,20	7,34	5,80

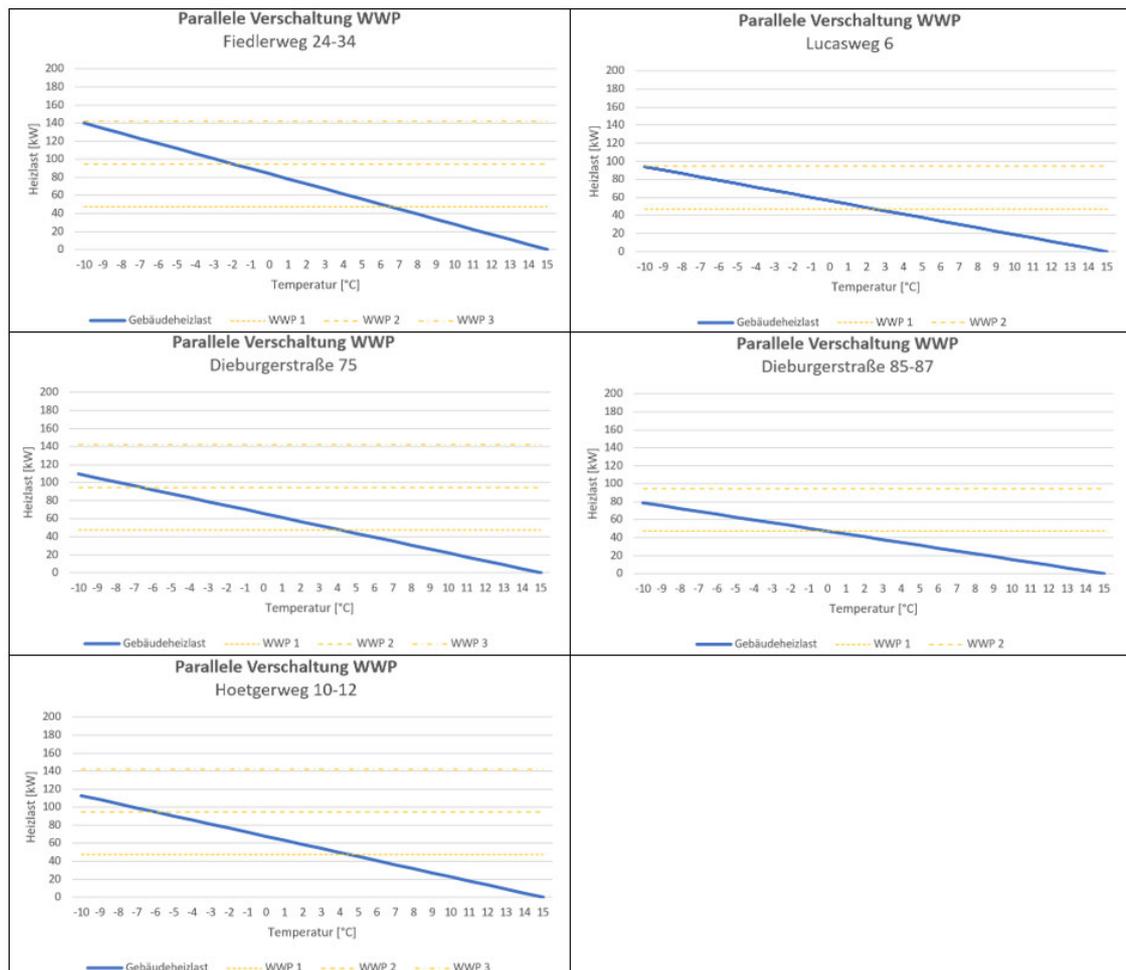


Abbildung 16 Parallele Verschaltung Wasser-Wärmepumpen (WWP)

Bei der Wasser-Wärmepumpe ist keine eigene Jahreszahlberechnung erforderlich, da der Hersteller den SCOP-Wert für 55 °C Vorlauftemperatur angegeben hat mit $SCOP_{WP} = 4,7$.

Auf die Notwendigkeit des Zwischenkreislaufs wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit im Kapitel 5.6.3 näher eingegangen. Nach Bonin (2018) ergibt sich bei Zuschaltung eines Zwischenkreislaufs eine Reduktion des Gesamtwirkungsgrads um 4 %. Dieser Wert wird für Wasser-Wärmepumpen in der VDI 4650-1 bestätigt. Somit verändert sich der angegebene SCOP-Wert zu $SCOP_{WP} = 4,7 * 0,96 = 4,51$.

Wie bei der Sole-Wärmepumpe beträgt der Deckungsgrad 100 % und damit ist der ermittelte $SCOP_{WP}$ -Wert gleichzeitig der SCOP-Wert für die WPA $SCOP_{WPA} = 4,51$.

5.5 Abschätzung verfügbarer Grundstücksfläche

Nach der Auslegung der Wärmepumpen ist die Bestimmung der verfügbaren Grundstücksfläche für eine technische Bewertung von Erdwärmeanlagen nötig. Die Approximation der möglichen Grundstücksfläche erfolgt auf Datengrundlage des Entwurfs zum Bebauungsplan O 32-Mathildenhöhe-Ost der Wissenschaftsstadt Darmstadt in Abbildung 17 (Wissenschaftsstadt Darmstadt 2020), sowie einer Begehung der Liegenschaften. Im ersten Schritt erfolgt der Abgleich der Grundstücksflächen unter Beachtung der betrachteten Gebäude und Flächen anderer Nutzung, wie Tiefgaragen. Anschließend werden von den möglichen Flächen die vorgegebenen Abstände zu Nachbarsgrundstücken und Hausfundamenten nach VDI 4640-1 subtrahiert.

Auf Basis dieser Fläche können für die Dimensionierungen der Wärmequellen die Entzugsleistungen der Bodenstrukturen berechnet werden. Aus den Entzugsleistungen und den Abständen der Wärmequellenanlagen zueinander ergeben sich nach VDI 4640-1 die Wärmemengen und Wärmeleistungen der Liegenschaften. Im Vergleich mit dem Bedarf der Wärmepumpen kann die technische Möglichkeit der Umsetzung ermittelt werden.

Wie in dem Liegenschaftsplan in Abbildung 17 zu sehen ist, sind die Gebäude der Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel als allgemeines Wohngebiet gekennzeichnet. Zudem ist aus dem Plan, sowie aus Begehungen des Areals sichtbar, dass sowohl unterhalb der Gebäude des Fiedlerwegs, als auch unterhalb der anderen betrachteten Häuser Tiefgaragen für die Bewohner liegen. Die möglichen Grundstücke ohne bauliche Hindernisse befinden sich nordwestlich, westlich und südlich der Gebäude des Fiedlerwegs. Die Grundstücke sind im Liegenschaftskataster mit den Bezeichnungen 156/16, 156/17, 146/28, sowie 146/24 gekennzeichnet. (Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation, 2024).

Die beiden Grundstücke 156/16 und 156/17 sind offiziell als öffentliche Grünflächen mit einem Spielplatz ausgewiesen. Im Süden an das Grundstück 156/16 anschließend, liegt eine rechteckige private Grünfläche. Auf dem Liegenschaftskataster ist zu erkennen, dass diese Fläche zwischen dem Standort Fachbereich Gestaltung der Hochschule Darmstadt und dem Gebäude C des Fiedlerwegs liegt. Für eine mögliche Nutzung dieser Fläche ist der Eigentümer zu ermitteln.

Südlich dieser Liegenschaft liegt eine große Fläche, genannt Flur 2 (146/24). Zunächst erschien diese Fläche gut geeignet für die mögliche Einbringung von Erdsonden und Erdkollektoren. Im Bebauungsplan ist das Flurstück 2 jedoch differenziert zu betrachten. Südlich des privaten Grundstücks bis zum Olbrichweg liegt eine öffentliche Grundstücksfläche 146/24. Nach dem Bebauungsplan der Stadt Darmstadt ist diese Grünfläche zugehörig zu dem Gebäude Olbrichweg 10, welches mit dem Garten zusammen unter Denkmalschutz steht. Damit sind Bebauungen dieser Grünfläche nur schwer möglich. Östlich dieser Fläche liegt ein Waldgebiet am Osthang, welches im Osten vom Fiedlerweg und im Süden vom Olbrichweg begrenzt wird. Jedoch ist diese Waldfläche zu einem großen Anteil mit einem weißen Dreieck auf schwarzem Hintergrund als kulturellem Zweck dienende Einrichtung gekennzeichnet. Um diese kulturelle Fläche herum liegt eine Fläche für den Gemeinbedarf (rot gekennzeichnet), welche mit Bäumen und Sträuchern bewachsen ist. Nach dem Bebauungsplan ist diese Fläche als Schutzfläche von Natur und Landschaft ausgewiesen. Eine grundlegende Veränderung dieser Fläche für das Einbringen von Kollektoren oder Sonden ist somit nicht erlaubt.

Daher ergeben sich als mögliche Fläche nur die öffentlichen Flächen 146/16, 146/17, die private Grünfläche im Süden als mögliche nutzbare Flächen. Bei den möglichen Grundstücken, wel-

che an die Liegenschaft Fiedlerweg angrenzen wird die Annahme getroffen, dass die Grundstücke mit einander verbunden werden können und somit kein Abstand zwischen den an den Fiedlerweg angrenzenden Grundstücksflächen zu beachten ist. In den folgenden Kapiteln werden diese Flächen für die Auslegung der oberflächennahen Geothermie genutzt.



Abbildung 17 Bebauungsplanentwurf O 32 Planteil 1 von 2 (Wissenschaftsstadt Darmstadt, 2020)

5.6 Dimensionierungen der Wärmequellen

Aufbauend auf den verschiedenen beschriebenen Wärmequellen aus Abschnitt 2.5 und den geologischen und hydrologischen Analysen folgt im weiteren Verlauf die Dimensionierung der Erdkollektoren, Sonden und Grundwasserbrunnen.

5.6.1 Erdkollektoren

In diesem Kapitel wird zuerst die Entzugsleistung der Bodenflächen berechnet. Anschließend wird die mögliche verfügbare Fläche für die Einbringung der Kollektoren ermittelt. Danach erfolgt die Erläuterung der Kollektorwerte. Beruhend auf den Entzugsleistungen werden die Kollektorgesamtlänge und die Anzahl an Kollektorkreisen berechnet.

Die Bodenentzugsleistungen sind je nach Wärmekollektorbauart unterschiedlich und dem Anhang der VDI 4640-2 zu entnehmen. Mit der ermittelten Darmstädter Geologie werden in den

Tabellen im Anhang B der VDI 4640-2 die Entzugsleistungen des Bodens durch den Mittelwert aus Schluff und Sand gebildet. Für die Tabellenspalte Klimazone wird ausgehend von Kapitel 5.3 Klimazone 8 gewählt. Für einen Horizontale Erdwärmekollektor und Abmessung $32 \cdot 3$ mm ergibt sich eine Entzugsleistung von $18,5 \text{ W/m}^2$.

Bei Erdwärmekollektoren ist ein Abstand von einem Meter zu Nachbargrundstücksgrenzen einzuhalten. Zusätzlich ist dieser Abstand zu Fundamenten von Tiefgaragen und Gebäuden bei der Auslegung von Kollektorflächen zu berücksichtigen.

Unter der Vermessung der möglichen nutzbaren Flächen mit Hilfe des in dem Bebauungsplan angegebenen Maßstabs ergibt sich eine maximale Fläche von ca. 3400 m^2 , siehe Abbildung 18.

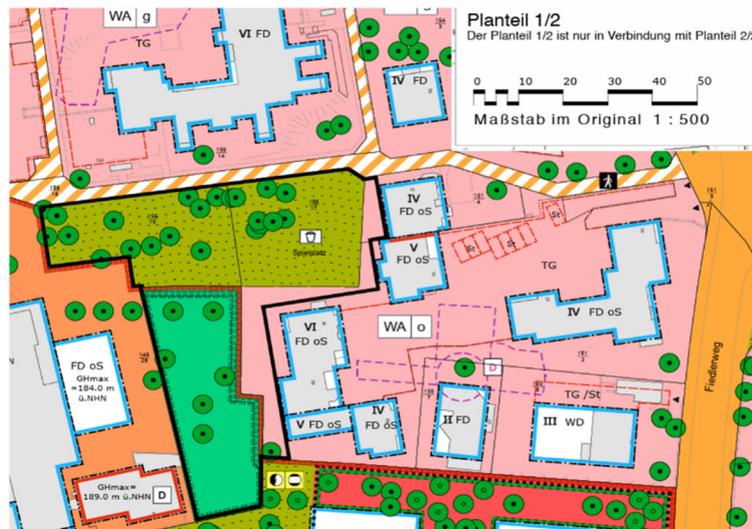


Abbildung 18 Verfügbare Kollektorfläche

In die Flächen werden die Erdkollektoren mit folgenden Dimensionen vorgesehen. Die Rohrdurchmesser sind wegen der hohen nötigen Leistung mit 32 mm angenommen. Der Abstand zwischen den Rohren beträgt 0,5 m. Die Rohrschleifenlänge betragen maximal 50 Meter und sind mäandrierend zueinander angeordnet. Begründet liegt die Länge je Rohrschleife darin, dass die verfügbare Fläche eine Seitenlänge von ca. 60 m aufweist.

Mit Formel 16 wird aus den benötigten Leistungen der Wärmepumpen und der ermittelten Entzugsleistungen die horizontale Kollektorfläche berechnet. Aus der benötigten Fläche ergibt sich mit dem Verlegeabstand und der Länge der Kollektoren die benötigte Anzahl der Kollektorkreise nach den Formeln 17 und 18: Eine horizontale Kollektorfläche benötigt eine Fläche von 28.919 m^2 . Die zu verlegende Rohrlänge beträgt 57.838 m . Es werden 1157 Kollektorkreise benötigt.

5.6.2 Erdsonden

Nach VDI 4640-2 ist für die Einbringung von Erdsonden ein Abstand von 10 m zum benachbarten Grundstück zu wählen. Damit wird die gegenseitige thermische Beeinflussung von Sonden auf Nachbargrundstücken verringert. Die im Kapitel 5.5 Abschätzung verfügbarer Grundstücksfläche getroffenen Annahmen bezüglich des Nachbargrundstücks Fiedlerwegs gelten weiterhin. Für die Auslegung werden die in der VDI 4640-2 definierten Mindestabstände zwischen Erdsonden von 6 m in einer rechteckigen Anordnung angenommen. Es ergeben sich pro Erdsonde eine benötigte Grundstücksfläche von 36 m^2 . Mit dem Abstand zu benachbarten Grundstücken und den Gebäuden des Fiedlerwegs, ergeben sich 16 mögliche Bohrungsstandorte, wie Abbildung 19 zeigt.



Abbildung 19 Verfügbare Sondenanzahl

Da die Auslegungstabellen für Erdwärmesonden als Berechnungsgrundlage eine Doppel-U-Rohr-Sonde mit den Maßen 32 mm · 3 mm verwenden, wird diese Grundlage in der folgenden Auslegung übernommen. Auch der Bohrlochdurchmesser mit 150 mm wird angenommen. Um aus den Tabellen eine mögliche Entzugsleistung entnehmen zu können, werden die Jahresvolllaststunden und die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds benötigt.

Für die Anzahl an Jahresvolllaststunden wird der Wert 2000 h genutzt, da dies nach Pistohl (2013) ein durchschnittlicher Wert von Heizungsanlagen für Mehrfamilienhäuser darstellt. Der Wärmeleitwert wird gemäß dem Kapitel 5.3 definiert. Aus VDI 4640-2 wird der am nächsten liegende Wert für die mittlere Wärmeleitfähigkeit genutzt. Da die benötigte Anzahl der Sonden höher liegt, als die maximal aufgeführte Anzahl, wird für die Entzugsleistung der kleinste verfügbare Wert genutzt. Dieser beträgt für Sonden bei 1800 Volljahresstunden 33,9 W/m und bei 2100 Volljahresstunden 30,8 W/m. Diese Werte werden durch lineare Skalierung auf den Wert von 2000 Volljahresstunden bezogen. Es ergibt sich eine Entzugsleistung von 31,8 W/m.

Nach Formel 19 ergeben sich für die benötigte Gesamtbohrtiefe dann 16.824 m

Durch Umstellung der Formel 20 nach der Länge der einzelnen Sonden ergibt sich aus der möglichen Anzahl von 16 Sonden eine Sondenlänge von 1052 m.

5.6.3 Grundwasserbrunnen

In diesem Kapitel wird die Wasserqualität des Darmstädter Grundwassers mit den im Kapitel Geologie definierten Grenzwerten verglichen. Zuerst wird die allgemeine mögliche Nutzung einer Wasser-Wärmepumpe bei vorliegenden Grundwasserdaten bewertet. Anschließend werden die Grenzwerte der Wasser-Wärmepumpe auf Grundlage der Herstellerangaben den Grundwasserkonzentrationen Darmstadts gegenübergestellt. Nach Analyse der Konzentrationen ergibt sich eine Aussage, ob eine Systemtrennung (Zwischenkreislauf) nötig ist. Anschließend wird die Leistung des Förderbrunnens ausgelegt. Da keine Daten für die Fließrichtung der Grundwasserleiter in dem Gebiet der Mathildenhöhe vorliegen, erfolgt keine Flächenabschätzung.

Die Konzentrationen des Grundwassers des hydrogeologischen Teilraums Bergsträßer Odenwald werden dem Grundwasserbericht Hydrologie von Hessen- Odenwald und Sprendlinger Horst entnommen (Becht et al., 2017). Da für die Inhaltsstoffe Chlorid und Hydrogenkarbonat die Äquivalenzkonzentrationen angegeben sind, werden diese für eine Vergleichbarkeit mit

den Grenzwerten aus Kapitel 5.3 umgerechnet. Außerdem sind in dem Bericht keine Konzentrationsdaten zu Eisen und Mangan aufgeführt, weshalb angenommen wird, dass die Stoffkonzentrationen im Grundwasser kleiner als 0,1 mg/l sind. Der Vergleich des Grundwassers für die Eignung einer Wasser-Wärmepumpe ergibt, dass aus hydrologischer Sicht das Grundwasser als Wärmequelle genutzt werden kann.

Tabelle 20 Vergleich Konzentrationen im Grundwasser Darmstadt mit Grenzwerten für Wasser-Wärmepumpe (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie 2017, S.98)

Inhaltsstoff	Grundwasser Darmstadt	Grenzwert
Eisen	Keine Angabe	< 2 mg/l
Mangan	Keine Angabe	< 1 mg/l
Aluminium	< 0,0442 mg/l	< 0,2 mg/l
Ammoniak	< 0,005 mg/l	< 2 mg/l

Tabelle 21 Vergleich Konzentrationen Grundwasser Darmstadt mit Grenzwerten der AERMEC S. p. A. für Edelstahl Platten-Wärmetauscher

Inhaltsstoffe und Kennwerte	Darmstadt	Grenzwert
pH-Wert	6,5 – 7,5	7,5-9
Phosphate	Keine Angabe	2 mg/l
Mangan	Keine Angabe	0,05 mg/l
Eisen	Keine Angabe	0,2 mg/l
Hydrogenkarbonat	54,92 mg/l bis 488,16 mg/l	300 mg/l
Chlor-Ionen	35,45 mg/l	50 mg/l
Sulfat	35 mg/l bis 75 mg/l	50 mg/l

Für die Bewertung, ob eine direkte Entnahme des Grundwassers möglich ist, oder die Nutzung eines Zwischenkreislaufs, werden die maximalen Konzentrationswerte für den Wärmetauscher des Herstellers AERMEC mit den Grundwasserkonzentrationen von Darmstadt verglichen, siehe Tabelle 21.

Im direkten Vergleich der Grenzwerte für den Plattenwärmetauscher mit dem Grundwasser in Darmstadt, folgt, dass wegen dem geringen pH-Wert des Grundwassers ein Zwischenkreislauf nötig ist.

Die Dimensionierung des Förderbrunnens, respektive des Nennvolumenstroms, hängt von der maximalen Entzugsleistung und der gewählten Temperaturspreizung ab. Nach VDI 4640-2 sind Temperaturspreizungen zwischen dem Förder- und dem Sickerbrunnen von maximal 5 K erlaubt. In der Praxis werden Temperaturspreizungen zwischen 3 K und 4 K verwendet. Mit der Gesamtheizlast aller Gebäude, einer Temperaturspreizung von 4 K, einer Wasserdichte ρ von 1000 kg/m³, sowie einer spezifischen Wärmekapazität des Wassers von 4,19 kJ/(kg · K), ergibt sich nach Formel 22 einen Nenndurchflussrate von 115 m³/h.

Auf das Jahr hochgerechnet bei einer jährlichen Betriebszeit von 2000 h ergibt sich mit Formel 23 ein Wert von $\dot{V}_{N,\alpha} = 230\,000\text{ m}^3/\text{a}$

6 Wirtschaftliche Bewertung

Für die zukünftige wirtschaftliche Bewertung der Wärmepumpen und Wärmequellen werden in dem ersten Teilkapitel die Fördermöglichkeiten und deren jeweiligen Bedingungen erläutert. Im zweiten Unterkapitel werden die Darlehensmöglichkeiten für die Finanzierung der Investitionen dargelegt. Als Grundlage für die Gesamtinvestitionskosten erfolgt im dritten Abschnitt die Definition der Kostenhöhen ausgehend von Herstellerangaben und durchschnittlichen Literaturdaten. Aufbauend auf diesen drei Unterkapitel werden in Abschnitt vier die jährlichen Kosten für die im Kapitel 5.4 und Kapitel 5.6 analysierten Wärmepumpen und Wärmequellen ermittelt und mit einander verglichen.

6.1 Förderarten und Bedingungen

Wärmepumpen und die Erschließung von Wärmequellen werden von Institutionen auf verschiedenen Ebenen gefördert. Dazu zählen auf Bundesebene das BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle), und die KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau). Zudem fördern auf städtischer Ebene einige Energieunternehmen und Wärmepumpenhersteller den Kauf und Einbau von Wärmepumpen.

6.1.1 Bundesförderung

Ausgehend von den verschiedenen Förderungen, werden innerhalb dieses Kapitels hierarchisch die Fördermöglichkeiten seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, sowie deren Bedingungen erläutert.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) bietet für die Umstellung auf Erneuerbare Energien, wie Wärmepumpen und Nahwärmenetze verschiedene Förderprogramme.

BEG EM Mit dem Programm Bundesförderung für effiziente Gebäude-Einzelmaßnahmen (BEG EM) werden private Hauseigentümer unterstützt. Dabei werden der Heizungs austausch, die Heizungsoptimierung und Maßnahmen für die Verbesserung der Energieeffizienz an der Gebäudehülle gefördert. Bei der Förderung wird unterschieden zwischen der Grundförderung, dem Klimageschwindigkeitsbonus, sowie gegebenenfalls einem Einkommensbonus. Zudem werden für bestimmte Wärmepumpen ein Effizienzbonus von 5 % gewährt (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024).

- Die Grundförderung ist unabhängig vom Antragssteller für alle bei der BAFA gelisteten Wärmepumpen beantragbar und beträgt 30 % der maximalen förderfähigen Gesamtsumme. Einzusehen sind die förderfähigen Wärmepumpen unter dem Datenblatt Liste der Förderfähigen Wärmepumpenanlagen auf der Webseite der BAFA (Stand 01.2024), siehe (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, 2023). Bewohnen die Eigentümer ein Einfamilienhaus, so sind die maximal förderfähigen Ausgaben auf 30.000 € begrenzt. In Mehrfamilienhäusern betragen die Grenzen der Investitionssummen in der ersten Wohneinheit 30.000 €. Von der zweiten bis zur sechsten Wohneinheit betragen die maximalen geförderten Investitionen 15.000 €. Ab der siebten Wohnung beträgt die förderfähige Summe maximal 8000 € (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024).
- Der Klimageschwindigkeitsbonus beträgt 20 % der förderfähigen Investitionssumme. Der Prozentsatz von 20 % gilt bis zum 31. Dezember 2028. Ab diesem Datum sinkt der Prozentsatz alle 2 Jahre um 3 %. Der Bonus findet in der Investitionsberechnung nur Anwendung, wenn die Heizungsanlage nach Umbau ohne fossile Energien betrieben wird. Existieren in

den Mehrfamilienhäusern Etagenheizungen oder Öfen für die Versorgung einzelner Wohnungen, so werden in der Berechnung der förderfähigen Gesamtausgaben nur die Wohnungen berücksichtigt, welche ausschließlich mit erneuerbaren Energien beheizt werden (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024).

- Ein Einkommensbonus in Höhe von 30 % der Investitionssumme existiert für Wohnungseigentümer mit einem maximalen zu versteuernden Haushaltseinkommen von 40.000 €. Hierbei wird das Durchschnittseinkommen aus dem dritten und zweiten Jahr vor der Antragsstellung berücksichtigt. In Mehrfamilienhäusern kann der Klimageschwindigkeitsbonus nur von Eigentümern beantragt werden, welche die Immobilie selbst nutzen. Für den Nachweis ist neben den Einkommensbescheiden zusätzlich die Meldebestätigungen aller Haushaltsmitglieder ab 18 Jahren mit Hauptwohnsitz in der Wohnung, sowie ein Grundbuchauszug erforderlich (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz 2024).
- Der Effizienzbonus in Höhe von 5 % wird für Wärmepumpen gewährt, die als Wärmequelle das Erdreich, das Grundwasser oder Abwasser nutzen. Eine andere Möglichkeit den Effizienzbonus zu erhalten, ist die Investition einer Wärmepumpe mit einem natürlichen Kältemittel (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz 2024).

Von den förderfähigen Investitionskosten sind die Gesamtzuschüsse auf maximal 70 % der Investitionssumme begrenzt. Stellt eine WEG einen Zuschussantrag, so kann einmalig die Grundförderung und der Effizienz-Bonus beantragt werden. Des Weiteren können alle selbstnutzenden Eigentümer den Einkommensbonus und den Klimageschwindigkeitsbonus beantragen. Liegen die Investitionssummen unter dem Maximalbetrag der förderfähigen Investitionen, so wird die unterhalb liegende Investitionssumme als Maximalbetrag definiert (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024).

BEW Ein weiteres Zuschussprogramm, die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) richtet sich an Unternehmen, Kommunen, sowie kommunale Eigenbetriebe. Mit dem Programm werden Transformationsmaßnahmen bestehender und der Aufbau neuer Wärmenetze gefördert. Als förderfähig gelten Wärmenetze, in welche mindestens 75 % erneuerbarer Energien eingespeist werden. Der Anteil an erneuerbaren Energien muss schrittweise die Meilensteine der Bundesregierung für die Jahre 2030 (25 %), 2035 (30 %) und 2045 (100 %) erfüllen.

Biomasseanteile an den erneuerbaren Energien sind bis zu einem bestimmten Prozentsatz erlaubt. Es wird unterschieden zwischen Wärmenetzen, welche eine Gesamtröhrlänge von größer als 50 km aufweisen und Wärmenetzen mit einer Rohrlänge kleiner als 50 km. Bei Gesamtröhrlängen größer als 50 km ist ein maximaler Biomassenanteil von 15 % im Endzustand erlaubt. Kleinere Wärmenetzen können einen Anteil von 25 % aufweisen. Es müssen mehr als 16 Gebäude oder mehr als 100 Wohneinheiten an das Wärmenetz angeschlossen sein. Die Förderungen werden in drei aufeinander aufbauende Module geteilt. (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022)

- (1) In Modul 1 geht es um eine Machbarkeitsstudie und Transformationspläne. In den Machbarkeitsstudien wird die technische und wirtschaftliche Möglichkeit für den Aufbau eines Wärmenetzes mit steigendem Anteil an erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2045 untersucht. Die erneuerbaren Energien können auch aus Abwärme gewonnen werden. Die Transformationspläne sind als schrittweise Umsetzung bei positiven Machbarkeitsstudien zu sehen. Beide Studien werden mit bis zu 50 % der förderfähigen Ausgaben gefördert. Die maximal förderfähigen Ausgaben liegen bei 2 Millionen € pro Projekt (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022).

- (2) In dem Modul 2 geht es hauptsächlich um die Bezuschussung der Investitionen für den Aufbau neuer oder Veränderung bestehender Wärmenetze. Es werden Anlagenkomponenten, wie Rohrleitungen und Übergabestationen der oberflächennahen und tiefen Geothermie gefördert. Die Förderungshöhe liegt bei bis zu 40 % der förderfähigen Gesamtinvestitionskosten von maximal 100 Millionen € pro Wärmenetz für 4 Jahre (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022).
- (3) Die Förderhöhe von Modul 3 liegt wie Modul 2 bei maximal 40 %. In dem Modul werden Einzelmaßnahmen an Wärmenetzen gefördert, wie Anschlussrohrleitungen vom Erzeuger oder die punktuelle Erweiterung bestehender Wärmenetze. Die Förderdauer liegt bei 2 Jahren (Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022).

6.1.2 Städtische- / und Hersteller-Förderung

Neben der Bundesförderung unterstützen auch die regionalen Versorgungsunternehmen den Einbau einer Wärmepumpe mit Zuschüssen. Der Energieversorger der Stadt Darmstadt die Entega Plus GmbH fördert beispielsweise den Einbau einer Wärmepumpe mit 500 €. Diese Förderung gilt einmalig nur für Kunden der Entega Plus GmbH, welche eine Wärmepumpe installieren lassen (Entega Plus GmbH, 2024).

Neben den regionalen Energieversorgern, fördern auch einige Hersteller den Kauf von Wärmepumpen oder Hybridgeräten. Beispielsweise gibt der Hersteller Buderus beim Kauf von bestimmten Wärmepumpen oder Wärmepumpe-Hybrid-Kombinationen einen Rabatt von 500 € bis 1.000 € auf den Listenpreis (Buderus Thermotechnik GmbH & Co. KG, 2024).

6.2 Darlehensarten

Aufbauend auf den ermittelten Förderungen werden die Darlehensmöglichkeiten der KfW-Bank erläutert. Im Weiteren folgt eine detailliertere Betrachtung der wirtschaftlichen Bedingungen des KfW-Programms Einzelmaßnahmen Ergänzungskredit-Wohngebäude 358/359 (KfW-Bank, 2024).

Für die Investitionen in erneuerbare Energie und Sanierungen bietet die KfW verschiedene Programme für Privatpersonen und Unternehmen an. In dem folgenden Abschnitt werden nur Programme für Privatpersonen bei der Heizungsförderung berücksichtigt.

Wenn der Zuschuss für die Heizungsmodernisierung von der BAFA genehmigt wurde, kann über das KfW-Programm Einzelmaßnahmen Ergänzungskredit-Wohngebäude 358/359 ein Kredit mit günstigen Zinskonditionen beantragt werden. Die Bedingung für die Auszahlung der Kreditsumme ist eine vorherige Zuschusszusage seitens der BAFA, welcher nicht länger als 12 Monate bei Antragsstellung des Kredits zurückliegen darf.

Der Ergänzungskredit 358 richtet sich an private Eigentümer, welche innerhalb der Immobilie wohnen und deren Haushaltseinkommen 90.000 € im Jahr nicht überschreitet. Die Haushaltseinkommensberechnung erfolgt analog zu der Methode des Einkommenszuschusses in der Förderung BEG EM. Übersteigt das Haushaltseinkommen diese Grenze, so gelten die Konditionen des Kredits 359. In beiden Kreditkonditionen wird unterschieden zwischen einem Annuitätendarlehen und einem endfälligen Darlehen. Bei einem Annuitätendarlehen wird jedes Jahr eine Annuität gezahlt, welche sich aus Zinsen und Tilgung zusammensetzt. Bei einem endfälligen Darlehen werden in der Laufzeit nur die Zinsen bezahlt. Den Kreditbetrag zahlt der Kreditnehmer am Ende der Laufzeit vollständig zurück. Bei den Annuitätendarlehen wird je nach Laufzeit der Kredite unterschieden. Die Tabelle 22 bildet die Parameter des vergünstigten Kredits 358 ab. In der Tabelle 23 sind die Rahmenbedingungen des Kredits 359 beschrieben (KfW-Bank, 2024).

Tabelle 22 Übersicht Darlehensbedingungen Kredit 358 KfW-Bank (KfW-Bank, 2024). Der Sollzins ist ein effektiver Jahreszins.

Kreditart 358	Laufzeit	Zinsbindung	Sollzins
Annuitätendarlehen	4 bis 5 Jahre	5 Jahre	0,01 % (0,01 %)
Annuitätendarlehen	6 bis 10 Jahre	10 Jahre	1,22 % (1,23 %)
Annuitätendarlehen	11 bis 25 Jahre	10 Jahre	1,97 % (1,99 %)
Annuitätendarlehen	26 bis 35 Jahre	10 Jahre	2,08 % (2,10 %)
Endfälliges Darlehen	4 bis 10 Jahre	10 Jahre	2,15 % (2,17 %)

Tabelle 23 Übersicht Darlehensbedingungen Kredit 359 KfW-Bank (KfW-Bank, 2024). Der Sollzins ist ein effektiver Jahreszins.

Kreditart 359	Laufzeit	Zinsbindung	Sollzins
Annuitätendarlehen	4 bis 5 Jahre	5 Jahre	3,83 % (3,90 %)
Annuitätendarlehen	6 bis 10 Jahre	10 Jahre	3,65 % (3,71 %)
Annuitätendarlehen	11 bis 25 Jahre	10 Jahre	3,63 % (3,69 %)
Annuitätendarlehen	26 bis 35 Jahre	10 Jahre	3,63 % (3,69 %)
Endfälliges Darlehen	4 bis 10 Jahre	10 Jahre	3,64 % (3,70 %)

6.3 Kostenanalyse der Wärmepumpensysteme

Für die Berechnung und den Vergleich der Gesamtkosten von Wärmepumpen-Systemen mit Heizungskessel mit fossilen Brennstoffen, werden in diesem Kapitel die Kostenhöhen definiert.

Die Investitionskosten der einzelnen Wärmepumpen ergeben sich aus Anfragen bei den Herstellern:

- Buderus übermittelte einen Listenverkaufspreis von 33 500 € für die WPS HT-48 (Setwin, 2024).
- Der Hersteller AERMEC gibt eine Bandbreite von 45.000 € für die WWP 0330 und 75 000 € für die WWP 0900 an (Bierschbach, 2024). Unter der Annahme einer linearen Kostensteigerung zwischen den acht Modellen der Serie ergibt sich für jede Leistungssteigerung Mehrkosten in Höhe von 3750 €. Da die WWP 0350 zwei Leistungsstufen über der WWP 0300 liegt, ergibt sich ein Listenpreis von ca. 52 500 €.
- Bei Stiebel-Eltron erfolgt die Ermittlung der Luft-Wärmepumpe-Preise über eine Online-Recherche. Auf dem Online-Shop der Webseite Heizungsdiscount24.de ergab sich ein Preis von ca. 35.000 € (Stand 11.03.2024) (Heizungsdiscount 24 GmbH, 2024).
- Die Erschließungskosten hängen linear von der Größe der zu installierende Anlage ab. Dabei lassen sich die Kosten in Abhängigkeit der benötigten Heizleistung oder Fläche/Tiefe berechnen. Für Erdsonden liegen die Kosten zwischen 1200 €/kW und 2450 €/kW (Glaesmann, 2022). Andere Quellen geben zwischen 1000 €/kW und 2400 €/kW an (Kaltschmitt et al., 2013).
- Nach Glassmann (2022) liegen Erdkollektoren bei mindestens 600 €/kW, höchstens bei 2500 €/kW. Kaltschmitt liegt mit den Werten 550 €/kW bis 2600 €/kW in einem sehr ähnlichen Bereich (Kaltschmitt et al., 2013).
- Weitere grobe Abschätzungen der Erschließungskosten für horizontale Erdkollektoren liegen zwischen 40 €/kW und 50 €/kW.

- Bei der Installation von Erdsonden können die Kosten mit 50 €/m bis 60 €/m abgeschätzt werden. Dies dient nur der groben Orientierung für oberflächennahe Bohrungen bis 99 m (Glaesmann, 2022). Bei größeren Bohrtiefen hängen die Kosten nicht mehr linear von der Tiefe ab, wie Abbildung 20 illustriert. Für die Berechnung der Erschließungskosten wird bei den Kollektoren der Mittelwert bei den Literaturangaben als Kostengrundlage genutzt. Die Kosten für Erdwärmesonden werden aus Abbildung 20 abgelesen.
- Die Kosten für Brunnenbohrungen sind stark abhängig von der Hydrologie und der Lage des Grundwassers. Wegen fehlender Daten wird bei der Kostenabschätzung auf die Dissertation von Altieri zurückgegriffen. Dort werden für eine Nennleistung von 186 m³/h insgesamt 6 Brunnenpaare dimensioniert, die ca. 140 000 € bei der Erschließung kosten. Jedes Brunnenpaar besteht aus einem Förder- und einem Schluckbrunnen. Es ergibt sich eine Förderleistung von 31 m³/h je Brunnen (Altieri, 2021). Für die im technischen Teil berechneten Förderleistung von ca. 115 m³/h sind somit 4 Brunnenpaare nötig.
- Zu den Betriebskosten zählen Wartungs- und Instandhaltungskosten. Zudem sind die Energiekosten für den Wärmepumpen-Strom Inhalt dieser Kategorie. Die jährlichen Wartungskosten sind bei Wärmepumpen gering. Diese liegen zwischen 50 €/a und 500 €/a. Ein genauerer Wert wird in einer Kostenvergleichsrechnung seitens Glaesmann (2022) mit 440 €/a für Luft-Wärmepumpen und 600 €/a für Sole-Wärmepumpen angegeben. Für Gasheizungsanlagen liegen Wartungskosten in einem ähnlichen Intervall, wie für Wärmepumpen. In der Vergleichsrechnung zwischen den Heizungsarten Gas und Wärmepumpe werden diese mit ca. 573 €/a angesetzt. Da für die Grundwassernutzung mit Brunnen keine Wartungskosten in der Tabelle 24 vorliegen, werden hierfür Wartungskosten von ca. 600 €/a angenommen.

Tabelle 24 **Verwendete Wartungskosten**

Heizungsart	Wartungskosten
Luft-Wärmepumpen	440 €/a
Sole-Wärmepumpen	600 €/a
Gaskessel	573 €/a

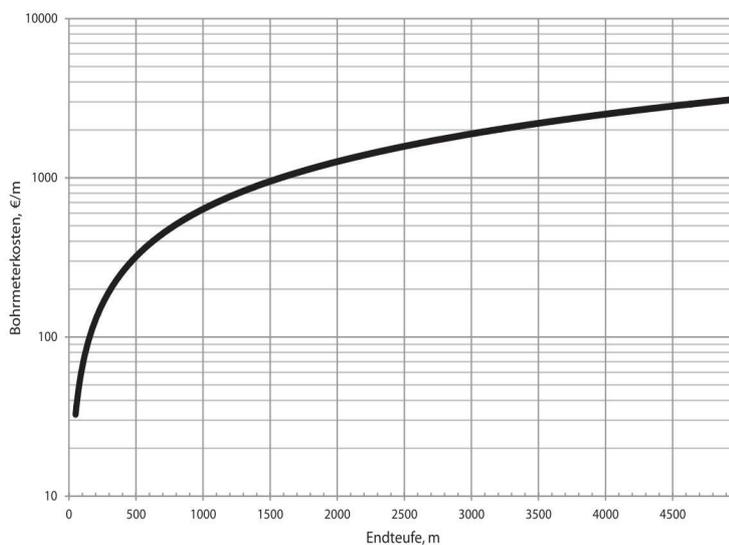


Abbildung 20 **Kosten je Bohrmeter bei verschiedenen Tiefen der Bohrung (Häfner et al., 2015, S.9)**

6.4 Kostenvergleich

In diesem Kapitel werden zuerst die kapitalgebundenen Kosten für alle Varianten ermittelt. Daran anschließend werden die möglichen Zuschüsse kalkuliert und von den Kapitalkosten subtrahiert. Mit den wirtschaftlichen Annahmen des KfW-Darlehens werden die kapitalgebundenen Gesamtkosten in eine Annuität umgerechnet. Im nächsten Schritt wird mit den berechneten SCOP-Werten der Wärmepumpen die jährlichen Betriebskosten der Wärmepumpen exemplarisch für das Jahr 2025 ermittelt. Zu der Annuität und den jährlichen Betriebskosten addieren sich die Wartungskosten zu einer jährlichen Kostensumme. Anschließend werden für einen Gesamtannuitätenvergleich die aktuellen Gaskosten berechnet. Am Abschluss des Kapitels erfolgt ein direkter Vergleich der Gas- mit den Wärmepumpen-Heizungskosten bis zum Jahr 2035.

Die Investitionskosten der Wärmepumpen ergeben sich aus der berechneten Anzahl der parallel verschalteten Wärmepumpen für die Deckung der definierten Heizlasten in den jeweiligen Gebäuden, welche mit den ermittelten Listenpreisen multipliziert wird. Für die Erschließungskosten werden die Wärmequellen in Kollektoren, Sonden und Brunnen aufgeteilt. Die Kosten je Grabmeter und die Kosten je Brunnen ergeben sich aus den Kostenannahmen. Da die Sonden wegen der begrenzten Fläche ungefähr 1000 m in das Erdreich reichen, werden die Bohrkosten über die Abbildung 20 abgeschätzt. In dem Diagramm ergeben sich für eine Bohrtiefe von ca. 1000 m Bohrkosten in Höhe von ca. 650 €/m. Alle Erschließungskosten werden mit den für die Wärmequellen-Art ermittelten Flächen, Tiefen oder Anzahlen multipliziert. Die Summe aus Investitionskosten und Erschließungskosten ergeben die benötigten Gesamtinvestitionskosten für die Umsetzung.

Tabelle 25 Berechnung der Investitionskosten der Wärmepumpen.

Gebäude	Anzahl LWP	Kosten	Anzahl SWP	Kosten	Anzahl WWP	Kosten
Fiedlerweg 24-34	4	140.000 €	3	100.500 €	3	157.500 €
Lucasweg 6	3	105.000 €	2	67.000 €	2	105.000 €
Dieburgerstraße 75	4	140.000 €	2	67.000 €	3	157.500 €
Dieburgerstraße 85-87	2	70.000 €	2	67.000 €	2	105.000 €
Hoetgerweg 10-12	3	105.000 €	3	100.500 €	3	157.500 €
Summe	16	560.000 €	12	402.000 €	13	682.500 €

Tabelle 26 Gesamtinvestitionskosten der Wärmequelle.

Wärmequelle	Wärmepumpe	Erschließung	Gesamt
Luft	560.000 €		560.000 €
Kollektoren	402.000 €	2.602.710 €	3.004.710 €
Sonden	402.000 €	10.940.800 €	11.342.800 €
Brunnen	682.500 €	560.000 €	1.242.500 €

Von den Gesamtinvestitionskosten werden die Zuschüsse der BMWK-Programme subtrahiert. Die maximal förderfähige Investitionssumme des BEG EM-Programms ergibt sich aus den Fördersummen pro Wohnung multipliziert mit der Anzahl an Wohnungen in den Gebäuden. Liegen die Investitionskosten unterhalb der maximalen förderfähigen Summe, so werden die

Investitionskosten als maximal förderfähige Summe deklariert. Von diesen ermittelten Summen können mit Hilfe der Förderungsprozentsätze die Höhe der Grundförderung und des Effizienzbonus berechnet werden. Der Klimageschwindigkeitsbonus ist nicht nur einmalig, sondern für jeden Eigentümer der Gebäude beantragbar. Für die Ermittlung des Bonus werden die förderfähigen Beträge pro Wohnung, welche von den Eigentümern bewohnt werden, mit dem Prozentsatz des Klimageschwindigkeitsbonus multipliziert und für alle Eigentümer aufsummiert. Aus der Grundförderung, des Effizienzbonus und dem Klimageschwindigkeitsbonus ergibt sich die Summe an Zuschüssen. Zu beachten ist in der folgenden Zuschussberechnung, dass die Zuschüsse für die Immobilie Lucasweg 6 und Dieburgerstraße 75 nur einmalig beantragt werden können, da es sich um die gleichen Eigentümer handelt. Da die Investitionskosten der Wärmepumpen geringere Beträge, als die maximal förderfähigen Gesamtsummen betragen, werden die ermittelten Investitionskosten als Referenzwert für die Ermittlung der Zuschüsse genutzt. Im Gegensatz zu den Sole-Wärmepumpen und Wasser-Wärmepumpen können bei den Luft-Wärmepumpen nicht alle Zuschüsse in Anspruch genommen werden. Der Klimageschwindigkeitsbonus entfällt, da die Luft-Wärmepumpen bivalent betrieben werden und die Voraussetzung für die Inanspruchnahme des Bonus ist, dass die Heizung ohne fossile Energieträger betrieben wird. Außerdem entfällt der Effizienzbonus, da in den analysierten Wärmepumpen keine natürlichen Kältemittel genutzt werden. Zuschüsse von Seiten des lokalen Energieversorgers Entega Plus GmbH oder der Hersteller finden in der Berechnung keine Anwendung, da die Bedingungen für die Zuschüsse, nicht erfüllt sind.

Für die Zuschüsse von Nahwärmenetzen (Sonden und Kollektoren) wird sich auf die beschriebenen prozentualen Fördersätze des Förderprogramms BEW bezogen. Da die Erschließungskosten für Sonden und Kollektoren unter der Grenze von 12 Millionen € liegen, wird in der Berechnung der Prozentsatz von 40 % des Moduls 2 verwendet. Mit den ermittelten Erschließungskosten für Sonden und Kollektoren ergeben sich die folgenden Zuschusshöhen, welche in Tabelle 27 gelistet sind.

Aus der Investitionssumme und der Zuschusssumme aus den Förderprogrammen wird die nötige Kapitalsumme für ein Darlehen bei der KfW berechnet. Mit den Konditionen des Kredits 359 wird die Annuität der Investition nach Formel 26 ermittelt.

Tabelle 27 Zuschüsse für Wärmenetze.

Wärmequelle	Zuschuss
Kollektoren	1.041.084 €
Sonden	4.376.320 €
Brunnen	224.000 €

Tabelle 28 Berechnung der Annuität für die Investitionskosten.

Wärmequelle	Investition	Zuschuss	Investition nach Zuschuss	Annuität
Luft	560.000 €	136.500 €	423.500 €	51.463 €/a
Kollektoren	3.004.710 €	1.203.334 €	1.801.376 €	218.899 €/a
Sonden	11.342.800 €	4.538.570 €	6.804.230 €	826.833 €/a
Brunnen	1.242.500 €	471.125 €	771.375 €	93.736 €/a

Nach den Investitionskosten werden die bedarfsgebundenen Kosten für die jeweiligen Wärmepumpen-Arten berechnet. Für die Sole- und die Wasser-Wärmepumpe werden mit den geschätzten zukünftigen Wärmebedarfen nach Sanierungsmaßnahmen und den SCOP-Werten,

die Stromkosten nach Formel 27 ermittelt. Bei den verketteten Luft-Wärmepumpen sind die Berechnungen umfangreicher, da für jedes Gebäude verschiedene Wärmepumpen-Deckungsgrade mit unterschiedlichem SCOP-Werten ermittelt wurden. Somit erfolgt die Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Stromkosten der Luft-Wärmepumpen für jede Liegenschaft ermittelt, indem der jährliche Wärmeverbrauchswert mit dem Deckungsgrad und dem Strompreis des Jahres 2025 multipliziert und durch die berechnete Jahresarbeitszahl geteilt wird.

Für den Gasverbrauch des Kessels im bivalenten System wird der Wärmebedarf mit dem Gaspreis des Jahres 2025 und dem Deckungsgrad des Heizkessels (100 % - Deckungsgrad Wärmepumpe) multipliziert. Diese beiden Werte summiert ergeben die bedarfsgebundenen Kosten der Wärmepumpe im Jahr 2025.

Summiert man alle jährlichen Kosten auf, so ergeben sich für die einzelnen Wärmepumpen-Arten und Wärmequellen folgende Gesamtkosten (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29 Jahresgesamtkosten der Wärmequellen

Kostenarten	Luft	Kollektoren	Sonden	Brunnen
Kapitalgebunden Kosten	51.463 €	218.899 €	826.833 €	93.736 €
Bedarfsgebundene Kosten	233.436 €	72.546 €	72.546 €	65.009 €
Wartungsgebunden Kosten	440 €	600 €	600 €	600 €
Jahresgesamtkosten	285.339 €	292.048 €	899.982 €	159.345 €

Um die Kosten der regenerativen Heizungen mit den Heizkosten bei vollständig fossiler Bereitstellung der Heizungswärme vergleichen zu können, werden die aktuellen und zukünftigen Gas und Stromkosten berechnet. Die Betrachtungsgrenzen für die Kosten werden mit den Jahren 2025 und 2035 definiert, da so ein Annuitätenvergleich mit den regenerativen Heizungssystemen erfolgen kann. Allgemein setzten sich die Heizkosten aus den Wartungskosten und den Brennstoffkosten für die Gasheizungen zusammen. Eine Abschätzung der zukünftigen prozentualen Kostensteigerung des Gaspreises erfolgt mit der Studie LowEx-Bestand Analyse. Dabei werden die Kosten für jedes Jahr aus dem Diagramm abgelesen und die prozentuale Steigerung oder Senkung zum darauffolgenden Jahr ermittelt. Äquivalent erfolgt die Vorgehensweise bei der Ermittlung der zukünftigen Strompreise. Als Ausgangsgrundlage werden bei den Gaspreisen die Kosten je kWh in der Studie genutzt. Bei den Strompreisen dient als Referenzwert für das Jahr 2025 der ermittelte durchschnittliche Strompreis in €/kWh im Kapitel 4.2 (Bongs et al., 2023). Aus den Ausgangswerten können die zukünftigen Strom- und Gaskosten bis zum Jahr 2035 ermittelt werden. Mit den Stromkosten und den Wartungskosten lassen sich die zukünftigen bedarfsgebundenen Kosten der Wärmepumpen ermitteln. Unter Nutzung der Gaskosten ist zudem eine Berechnung der zukünftigen bedarfsgebundenen Kosten für die bivalente Luft-Wärmepumpe möglich. Zum Abschluss erfolgt eine Gegenüberstellung der Gesamtannuitäten der Alternativen mit einer weiteren zukünftigen fossilen Nutzung von Gas. Ausgenommen von dem direkten Vergleich ist die Sole-Wärmepumpe mit Erdsonden, dies aufgrund der hohen Investitionskosten und damit einhergehenden hohen Annuität.

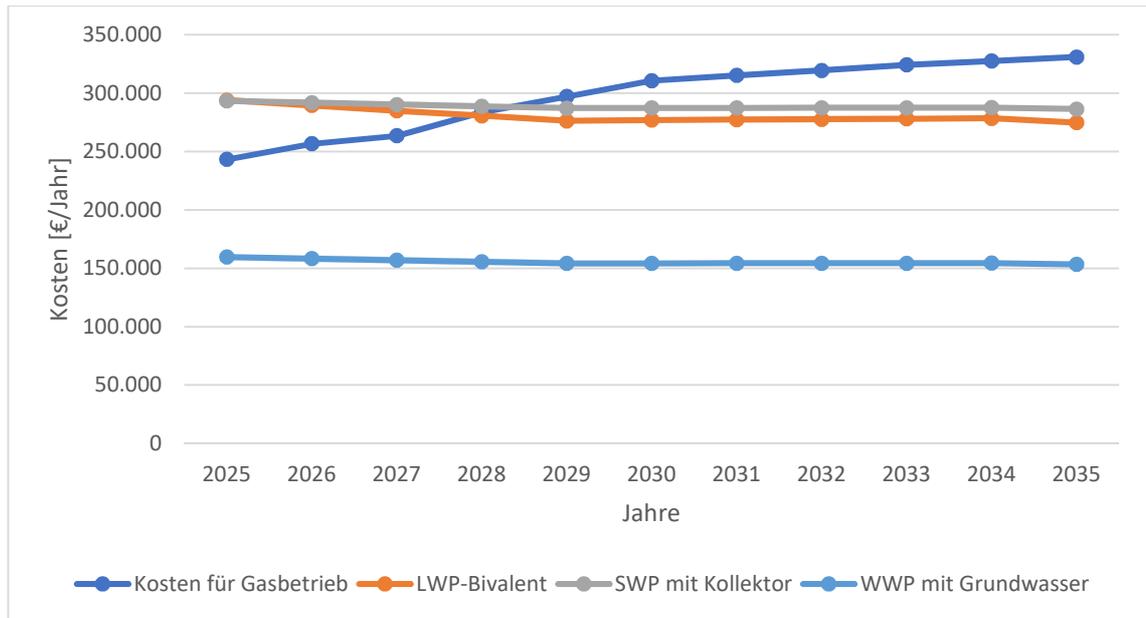


Abbildung 21 Kostenvergleich Wärmepumpen mit Gasheizung

7 Diskussion der Analyseergebnisse

In diesem Kapitel werden die beschriebenen Ergebnisse innerhalb der technischen Umsetzung, sowie der wirtschaftlichen Analyse diskutiert. Zudem wird auf mögliche Folgeprojekte verwiesen.

Im Kapitel 5 Auslegung der Wärmepumpensysteme wurden vier Wärmequellen für eine Substitution der fossilen Gasheizungen in insgesamt neun Mehrfamilienhäusern am Standort Darmstadt analysiert. Bei den Gebäuden handelt es sich um mehrgeschossige Häuser mit den Baujahren zwischen 1977 und 1984. Die analysierten Wärmequellen für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie teilen sich in Luft, Erdkollektoren, Sonden, sowie Grundwasser auf. Durch die Analyse ist es möglich qualitative Aussagen über eine technische Umsetzung auf dem Gelände der Liegenschaften der Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel zu treffen.

Bei den Auslegungen der Luft-, Sole- und Wasser-Wärmepumpe für die Heizleistungen der Gebäude, ergeben sich unterschiedliche Leistungs- und Jahresarbeitszahlen, welche in einem Intervall von 2,68 bis 4,51 liegen. Diese hohe Differenz lässt sich vor allem durch die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Wärmepumpe erklären, welche in den folgenden Unterpunkten diskutiert werden. Anschließend erfolgt eine Realitätsvalidierung der Jahresarbeitszahlen.

Wärmequellen-Temperatur Zurückzuführen ist die Varianz der Jahreszahlen unter anderem auf die verschiedenen Temperaturen der Wärmequellen. Bei hohen konstanten Temperaturen der Wärmequelle muss die Wärmepumpe durch den Verdichter eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Vorlauftemperatur leisten. Die Werte der Leistungszahlen sind höher, da weniger elektrische Energie aufgewendet werden muss. Aus den COP-Werten ergeben sich die SCOP-Werte. Da die Temperatur im Grundwasser ganzjährig bei ca. 10 °C liegt, weist die Wasser-Wärmepumpe die höchste Jahresarbeitszahl auf. Im Gegensatz dazu ist die Jahresarbeitszahl einer Luft-Wärmepumpe am geringsten von allen Systemen, da die Lufttemperaturen innerhalb des Jahres in einem weiten Temperaturintervall schwanken. Außerdem sinkt der COP-Wert der Luft-Wärmepumpe durch die benötigte Abtaufunktion bei tiefen Außentemperaturen. Da dieser Wert als Grundlage für die Berechnung des SCOP-Wertes dient, ist der direkte Vergleich der Luft-Wärmepumpe zu der Sole- und Wasser-Wärmepumpe komplex, da diese geothermische Wärmequellen nutzen und keine Reduktion des COP-Wertes wegen konstanten Quellentemperaturen aufweisen.

Betriebsarten Ein weiterer Einflussfaktor sind die bivalenten und monovalenten Auslegungen, da beide Auslegungsformen auf unterschiedlichen Deckungsgraden und zu betrachtenden Umweltfaktoren basieren. In der bivalenten Auslegung wird der Deckungsgrad erst über den Leistungsanteil der Wärmepumpe an der Gesamtheizlast ermittelt. Es ist aus dem direkten Vergleich des SCOP-Wertes nach der Auslegung mit dem Deckungsgrad ersichtlich, dass der SCOP-Wert bei abnehmendem Deckungsgrad sinkt. Der Deckungsgrad wiederum ist abhängig von dem Leistungsanteil. Und der Leistungsanteil ist abhängig von der Anzahl an Wärmepumpen am Bivalenzpunkt, beziehungsweise einer gewählten Über- oder Unterdimensionierung. Je größer die Überdimensionierung der Anzahl Wärmepumpen am Bivalenzpunkt, desto größer ist der Leistungsanteil an der Gesamtheizlast und damit der SCOP-Wert. Vergleicht man die Überdimensionierung, wie es bei dem Gebäude Dieburgerstraße 85-87 (mit 0,31 überdimensionierten Luft-Wärmepumpen) im Vergleich zu dem Gebäude Hoetgerweg 10-12 (mit 0,58 überdimensionierten Luft-Wärmepumpen) zu sehen ist, sind die Leistungsanteile größer, je größer die Überdimensionierung ausfällt. Bei einer leichten Unterdimensionierung

sind die Deckungsgrad und damit auch die SCOP-Werte geringer, als bei einer Überdimensionierung. Dies begründet die Spannweite der ermittelten SCOP-Werte. In den monovalenten Auslegungen liegt der Deckungsgrad bei 100 %. Somit wird der SCOP-Wert immer höher liegen, als in der bivalenten Auslegung.

Methodisches Vorgehen Auch die gewählten methodischen Vereinfachungen können Einflüsse auf die SCOP-Werte haben.

So wurde der Bivalenzpunkt in der Vorgehensweise mit Hilfe einer linearen Heizkurve ermittelt. Die Vorlauf- und Rücklauf-temperatur der Heizung wurden als Geraden approximiert. In der realen Analyse von Heizkurven sind die Temperaturlinien jedoch exponentiell verlaufend. Je geringer die Heizlast, desto flacher die Heizkurve. Somit würde sich der Bivalenzpunkt, damit die zu leistende Heizlast der Wärmepumpen und so letztendlich die Anzahl der Wärmepumpen geringfügig ändern (Bohne 2022).

Eine weitere gewählte Vereinfachung war die Annahme von Sanierungen auf die Effizienzstufe B und damit einhergehender Reduktion der Heizlast zwischen 40 % und 60 %. Hierbei ist kritisch zu hinterfragen, ob sich der Wärmebedarf linear zu der Heizlast und einer Reduktion der Vorlauf-temperatur bei den Sanierungsmaßnahmen verhält und prozentual um den gleichen Faktor sinkt. Dieser Zusammenhang wurde bei den Sanierungsmaßnahmen angenommen und muss in der Realität validiert werden.

Realitätsvalidierung der technischen Ergebnisse Die parallel verschalteten Luft-Wärmepumpen weisen einen SCOP-Wert in der bivalenten Betriebsweise zwischen 2,68 und 2,92 auf. Im direkten Vergleich der Jahresarbeitszahlen mit der Studie Wärmepumpen in Bestandsgebäuden des Fraunhofer-Instituts werden diese Zahlen bewertet.

In der Studie des Fraunhofer-Instituts wurden Gebäude mit ähnlichen Ausgangsbedingungen, wie in dieser Bachelorarbeit, betrachtet. Es handelt sich um Gebäude der Bauperioden 1949-1979 und 1981-1994 mit hohen Vorlauf-temperaturen von bis zu 51 °C und einem Deckungsanteil der Raumheizlast von 85 %.

In der Studie ergaben sich Jahresarbeitszahlen zwischen 2,5 und 3,3, mit einem Mittelwert von 3,07. Jedoch ist hier anzumerken, dass die bivalenten Systeme nicht nur für die Raumheizung, sondern auch für die Trinkwasserversorgung zuständig sind, anderes als in den Annahmen dieser Arbeit. Außerdem liegen die mittleren Heizkreislaufvorlauf-temperaturen in dieser Studie in einer großen Spannweite zwischen 34 °C und 51 °C und nicht wie in den technischen Annahmen bei 55 °C. Zudem sind die Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf-temperatur mit durchschnittlich 5 K nur halb so groß, wie in den technischen Annahmen, welche mit 10 K definiert wurde. Auf Grund des größeren Temperaturhubs der Wärmepumpe, sowie der höheren Differenz von Vor- und Rücklauf-temperatur in der Heizung, welche mit einer Reduktion des SCOP-Wertes einhergehen, ist es plausibel, dass die berechneten SCOP-Werte (2,68 – 2,92) unterhalb des Mittelwertes liegen. Da die Temperaturdifferenz der Heizung einen größeren Einfluss auf die Veränderung der SCOP-Werte, als die Deckungsgrade haben, sind die berechneten SCOP-Werte als validiert zu bewerten, trotz eines höheren Deckungsgrades von bis zu 97,5 % in der eigenen Berechnung. Am nächsten an den getroffenen Annahmen liegt ein Gebäude der Studie mit einer Vorlauf-temperatur von ca. 51 °C und einer Arbeitszahl von 2,8. (Günther et al., 2020).

Für die Sole-Wärmepumpe ergibt sich in den Berechnungen ein SCOP-Werte von 4,06 ohne Heizstab und 3,98 mit Heizstab. Auch diese Jahresarbeitszahl ist unter Betrachtung der Studie Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern im Bestand als validierbar einzuschätzen. In der Stu-

die ergibt sich für den bivalenten Einbau einer Wärmepumpe mit Sonden in ein Mehrfamilienhaus aus den 1980er Jahren in Berlin Schöneberg eine gemessene Jahresarbeitszahl von 3,8. Bei dem Vergleich ist anzumerken, dass die Effizienzklasse des Berliner Gebäudes bei der Effizienzklasse C liegt und in dieser Arbeit die Effizienzklasse B für alle Gebäude angenommen wurde (Clausen & Hinterholzer, 2023). Die leichte Erhöhung der Arbeitszahl von 3,8 auf 4,06 erscheint unter diesem Faktor als möglich.

Die Bewertung der Wasser-Wärmepumpen-Anlage erfolgt an Hand des Referenzprojektes Sparkasse Kamp-Lintfort. In dem Projekt sind 4 Wasser-Wärmepumpen parallel zusammengeschaltet, welche eine Heizleistung von 378 kW erreichen. Die Vorlauftemperaturen erreichen 50 °C und damit einen ähnlichen Wert, wie in dieser Arbeit. Für das Sparkassengebäude ergibt sich ein gemittelter SCOP-Wert von 5,0. Im direkten Vergleich mit dem berechneten Wert von 4,51, ist dieser als validiert anzusehen, da die Vorlauftemperatur in dieser Arbeit um 5 K höher liegt. Zudem wird der SCOP-Wert durch einen Zwischenkreislauf verringert. Bei dem Referenzobjekt der Sparkasse existiert keine Angabe, ob ein Zwischenkreislauf nötig ist. (Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., 2024)

An dem Standort Mathildenhöhe wurde die Eignung verschiedener Wärmequellen untersucht. Nach dem Geologie Viewer des HLNUG ist die Mathildenhöhe theoretisch gut für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie geeignet (Hessisches Landesamt für Naturschutz, 2024). Die berechneten maximalen Entzugsleistungen von 18,5 kW/(m² · a) liegen im Durchschnitt, verglichen mit den typischen maximalen Entzugsleistungen für die Gesteinsarten Sand, Lehm, Schluff und sandiger Ton in der VDI 4640. Dies erklärt den hohen nötigen Flächenverbrauch von ca. 29.000 m² für die Beheizung der Gebäude. Ein weiterer limitierender Faktor ist die hohe Flächenversiegelung und die Denkmalschutzbestimmungen von Flächen auf der Mathildenhöhe. Es ergaben sich eine maximal nutzbare Fläche von ca. 3400 m² für Wärmequellen. Gerade für die oberflächennahe Geothermie werden unversiegelte Flächen benötigt. Eine Nutzung der Geothermie durch Kollektoren ist wegen der hohen Differenz zwischen der benötigten und verfügbaren Fläche nicht möglich. Selbst unter der Berücksichtigung der Heizlastreduktion durch Sanierungen auf den Effizienzstandard B besteht keine Umsetzungsmöglichkeit.

Bei der Nutzung von Erdwärmesonden für den Entzug oberflächennaher oder tiefer Geothermie-Wärme spielt die verfügbare Fläche eine geringere Relevanz, da Sonden in die Tiefe geführt werden können. Die maximale Entzugsleistung der Sonden wurde mit 33,9 W/m ermittelt. Dieser Wert liegt unterhalb des Mittelwertes der maximal möglichen Entzugsleistungen innerhalb der Klimazone 8. Begründen lässt sich dieser Wert durch die Wärmeleitfähigkeit der Umgebung und der Anzahl an Sonden. Innerhalb einer Probebohrung der Brauerei Fay an dem Standort wurden mittlere Wärmeleitfähigkeiten von ca. 2 W/(m · K) für eine Tiefe von ca. 60 m ermittelt. Die laut VDI 4640 maximal verfügbare Sondenanzahl liegt bei fünf Sonden. Da auf der verfügbaren Fläche der Liegenschaften 16 Sonden eingebaut werden können, wurde die höchste verfügbare Anzahl in der Tabelle der VDI 4640 genutzt. Mit den Entzugsleistungen wurden die nötigen Tiefen der Sonden ermittelt, welche ca. 1000 m je Sonde sind. Auf Grund der fehlenden Daten für 1000 m Tiefe, ist in Näherung die ermittelte Entzugsleistung von 60 m Tiefe auf eine Tiefe von 1000 m skaliert worden. Diese Näherung ist kritisch zu hinterfragen, da die Entzugsleistungen bei Veränderung der Gesteinsschichten geringer oder höher liegen kann. Auch eine mögliche Reduktion der Entzugsleistungen durch eine höhere Anzahl als fünf Sonden ist in einer realen Auslegung zu beachten.

Die letzte untersuchte Wärmequelle ist das Grundwasser, welches die höchste Quellentemperatur von den betrachteten Wärmequellen aufweist. Es ergab sich eine nötige Wasserentnahme von ca. 230.000 m³ im Jahr. Im Vergleich zu der in Darmstadt verbrauchten Menge an Grundwasser von Industrie und Gewerbe mit ca. 1.523.000 m³ im Jahr ergibt dies eine Wasserentnahmerate von ca. 15 %. Für die reine Wärmeversorgung von neun Gebäuden ist dieser Wert im Vergleich zu dem jährlichen Wasserverbrauch aller Großgewerbe in Darmstadt als überdurchschnittlich anzusehen. Dabei unterliegt die Beachtung, dass dies den Entnahmewert nach Sanierungsmaßnahmen der Gebäude darstellt (Uebers, 2023). Zudem ist die technische Umsetzbarkeit fraglich, ob die Grundwasserleiter an der Mathildenhöhe eine Mächtigkeit und Tiefe aufweisen, um diese Menge fördern zu können. Hierzu müssen weitere Daten erhoben werden. Somit kann eine technische Bewertung der Nutzung von Grundwasser abschließend nicht erfolgen.

In der wirtschaftlichen Analyse ergab der Kostenvergleich, dass parallel verschaltete Luft-Wärmepumpen bereits nach 4 Jahren geringere Annuitäten aufweisen, als eine rein fossil betriebene Gasheizung. Diese Eindeutigkeit ist kritisch zu betrachten, da in der Berechnung keine nötigen Umbaumaßnahmen enthalten sind. Gerade in Gebäuden, wie der Dieburgerstraße 75 oder dem Lucasweg 6, in welchen die Heizungen im Dachgeschoss liegen, müssen erst einmal Anschlussleitungen vom Dachgeschoss zu einem möglichen Aufstellungsort der Wärmepumpe verlegt werden. Dies verursacht zusätzliche Kosten, wodurch die realen Annuitäten höher liegen, als die berechneten Annuitäten. Zudem ist ersichtlich, dass die Sole-Wärmepumpe mit Kollektoren wie die Luft-Wärmepumpe nach 4 Jahren eine geringere Annuität aufweist, als rein fossiler Heizungsbetrieb. Jedoch ist, wie in der technischen Analyse erläutert, die verfügbare Fläche für ein Einbringen der Kollektoren zu gering für die nötigen Leistungen. In dem Kostenvergleichsdiagramm ist außerdem sichtbar, dass die Nutzung von Grundwasser am günstigsten von allen Varianten ist. Bei der Berechnung der Annuität der Wasser-Wärmepumpe wurde jedoch nicht der benötigte Strom für den Betrieb der Tauchpumpe für die Förderung des Grundwassers berücksichtigt, sodass sich die Annuität, wie bei der Luft-Wärmepumpe erhöhen wird. Auch bei der Wasser-Wärmepumpe ist die mögliche technische Umsetzung mit weiteren geologischen und hydrologischen Untersuchungen zu klären. Zudem beruhen die Berechnungsgrundlagen der Annuitäten auf Kostensteigerungen des Gases und Kostensenkungen von Strom auf Grundlage der Studie LowEx-Bestand Analyse für die nächsten 10 Jahre. Ob diese Kostenveränderungen in der Zukunft eintreten werden, ist vom heutigen Zeitpunkt aus nicht abzusehen.

Aus der Diskussion ergibt sich die Luft-Wärmepumpe als technisch und wirtschaftlich optimale Lösung zum aktuellen Zeitpunkt.

Selbst bei einer angenommenen Reduktion der Heizlast in Folge von Sanierungsmaßnahmen an den Gebäuden, ist die Installation von Sole-Wärmepumpen mit Kollektoren auf den Grundstücken auf dem Mathildenhügel wegen der geringen verfügbaren Freifläche nicht ausführbar. Damit ist eine technische Umsetzung nicht möglich, obwohl die Jahresarbeitszahlen größer als bei der Luft-Wärmepumpe sind und damit der resultierende Stromverbrauch. Jedoch liegen die wirtschaftlichen Gesamtannuitäten wegen der Installationskosten höher als bei den Luft-Wärmepumpen. Bei der Nutzung von Erdsonden als Wärmequellen der Sole-Wärmepumpen ergeben sich Installationskosten, welche ein vierfaches der Gesamtannuität mit Kollektoren entsprechen. Dies liegt vor allem an der großen Einbringungstiefe von ca. 1000 m auf Grund der begrenzten Freifläche auf den Grundstücken.

Im direkten Vergleich der Wasser-Wärmepumpen mit der Nutzung von Grundwasser liegen die Annuitäten unterhalb derer der Luft-Wärmepumpen. Jedoch wurden bei der technischen

Betrachtung der Pumpenstrom nicht berücksichtigt, welcher einen Großteil des Stromverbrauchs bei der Nutzung von Grundwasser ausmacht. Für eine exakte wirtschaftliche Bewertung der Wasser-Wärmepumpe müssten weitere hydrologische und technische Analysen folgen.

Ausblick Weitere Analysegebiete mit der Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel können in technische und wirtschaftliche Fragestellungen unterteilt werden. Technische Projektfragestellungen sind unter anderem:

- In welcher Form eignet sich Darmstadt mit speziellem Fokus auf den Mathildenhügel für die hydrologische Nutzung in Bezug auf Wärmepumpen?
- In welcher Form könnte sich die Nutzung der Abwassertemperatur als Wärmequelle für erneuerbare Energien rechnen?
- Wie verändert sich die Kostenstruktur bei der Kombination von Wärmepumpen mit Photovoltaik und ist die Kombination an der Mathildenhöhe umsetzbar?
- Ist die Umsetzung eines Nahwärmenetzes an der Mathildenhöhe und ggf. mit Kombination von Solarthermie und Blockheiz-Kraftwerk sinnvoll?

Weitere wirtschaftliche Fragestellungen sind unter anderem:

- Wie und bis zu welchem Grad können die benötigten Investitionskosten bei Wohnungsgesellschaften auf die Mieter verteilt werden?
- Wie und zu welchem Zeitpunkt können Kosten für Umrüstung auf erneuerbare Energien auf die Mieter umgelegt werden?

8 Empfehlungen zur Umsetzung

Wie in der Diskussion zusammengefasst wurde, ergibt sich aus der Analyse der vier oberflächennahen Wärmequellensysteme, unter Beachtung der technischen und wirtschaftlichen Annahmen, dass nur parallel verschaltete Luft-Wärmepumpen sinnvoll sind. Für Kollektoren ist die verfügbare Fläche auf den Liegenschaften zu gering und Sonden müssten in eine Tiefe von ca. 1000 m reichen. Sonden führen zu einer drei bis viermal größeren Gesamtannuität, als alle anderen untersuchten Annuitäten und sind damit als nicht wirtschaftlich im Vergleich zu den anderen Systemen zu bewerten. Wasser-Wärmepumpen benötigen weitere technische und wirtschaftliche Analysen und Bewertungen.

Diese Handlungsempfehlung teilt sich in kurzfristige und langfristige Maßnahmen auf. Als kurzfristige Lösung wird den Eigentümer der Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel geraten, einen hydraulischen Abgleich der Heizungen durchzuführen. Bei einem hydraulischen Abgleich werden die Heizlasten der einzelnen Gebäuderäume und die damit nötigen Volumenströme von dem Heizungskessel zu den Raumheizungen über die DIN EN 12831 berechnet. Bei verschiedenen Druckunterschieden in den Heizungsrohren können einige Heizungen über den Volumenstrom nicht genügend Wärme erhalten. Nach der Berechnung der Volumenströme werden diese an den Ventilen der Heizungen eingestellt (Heße 2020). Dieses Verfahren bringt folgende Vorteile für die Anwohner: Zunächst dient das Verfahren des Hydraulischen Abgleichs für eine Reduktion der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke (Vorlauftemperatur). Da die Wärmequellen-Temperatur nicht beeinflussbar ist, führt die Reduktion der Vorlauftemperatur zu einer Erhöhung der SCOP-Werte der Wärmepumpen und damit zu einer Reduktion der zukünftigen Stromkosten.

Des Weiteren empfiehlt sich ein Austausch von unterdimensionierten Heizkörpern in einzelnen Räumen: Nach Lämmle et al. (2019) hat diese Maßnahme durch den Austausch von ca. 7 % den bestehenden Heizkörpern zu einer Reduktion der verbrauchsgebundenen Betriebskosten einer Sole-Wärmepumpe um 23 % geführt. Da einzelne Heizkörper nur eine geringe Investitionssumme erfordern, ist der Austausch eine wirtschaftliche Maßnahme. In der Studie werden Investitionskosten von 500 € je Heizkörper genannt. Ähnliche Einsparungen sind auch bei den analysierten Liegenschaften denkbar.

Heizkörper, welche nicht ausgetauscht wurden, können mit sogenannten Heizkörperverstärkern aufgerüstet werden. Dabei handelt es sich um Ventilatoren, welche mit Magneten unter dem Heizkörper befestigt werden. Durch die Luftkonvektion bei laufender Heizung kann die Heizkörperleistung um bis zu 50 % höher liegen, als ohne Ventilatoren. Anhängig ist die Heizkörperleistung von der Anzahl und Drehzahl der Ventilatoren (Bongs et al., 2023).

Als langfristige Maßnahme sollten für die Reduktion der Vorlauftemperatur und dem effizienten Betrieb einer Wärmepumpe die Gebäude saniert werden. Mit dem bivalenten System aus Luft-Wärmepumpe und Gaskessel kann die Modernisierung jedoch in mehreren Schritten über einen längeren Zeitraum als 10 Jahre erfolgen (Landes Energie Agentur Hessen GmbH, 2020). Ab einem bestimmten Sanierungsgrad kann die Luft-Wärmepumpe den Wärmebedarf dann vollständig decken.

Eine weitere langfristige Maßnahme für die Erhöhung der Wärmeabgabe und Reduktion der Vorlauftemperatur stellt die Vergrößerung der Heizflächen dar. Diese können als Fußboden-, Decken-, oder Wandheizungen aufgebaut sein. Für die Nachrüstung in Bestandsgebäuden existieren spezielle Systeme mit einem niedrigen Gesamtaufbau von 27 mm Höhe. Der Einbau von einigen Systemen kann innerhalb weniger Tage durchgeführt werden. Deckenheizungen

haben den Vorteil gegenüber Fußbodenheizungen, dass eine höhere Leistung übertragen werden kann, da zwischen den Heizspiralen nur Gips und nicht wie beim Fußboden zum Beispiel Parkett liegt. Wandheizungen weisen eine ähnliche Heizleistung wie Deckenheizungen auf. Einbaubedingungen in den Räumen sind freie Wandflächen, was sich auf die Stellflächen von Möbeln auswirken kann. Prinzipiell lassen sich auch alle drei Verfahren miteinander kombinieren (Seifert, 2023). Vor der Umsetzung dieser Maßnahme ist in den einzelnen Wohnungen der Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel zu klären, ob diese Nachrüstung der Heizflächenvergrößerung technisch möglich ist. Anschließend könnten die Wohnungen der Reihe nach umgerüstet werden.

9 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurden die Substitutionsmöglichkeiten von fossilen Brennstoffen in Heizungsanlagen durch erneuerbare Energien mit Wärmepumpen exemplarisch an fünf Liegenschaften der Mathildenhöhe in Darmstadt untersucht. Wegen der hohen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten von Wärmepumpensystemen wurde sich in dieser Arbeit auf die technische und wirtschaftliche Analyse der Arten Luft-, Sole- und Wasser-Wärmepumpe in der mono- und bivalenten Auslegung beschränkt. Als mögliche Wärmeübertrager wurden Luft, Kollektoren, Sonden und Grundwasser betrachtet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen eine hohe Wirtschaftlichkeit einer anteilig fossilen Energieträgersubstitution durch ein bivalentes System aus Gaskessel für die Spitzenlast und parallel verschalteten Wärmepumpen für die Grundlast. Unter der Annahme einer Finanzierungsdauer von 10 Jahren ergab sich eine relative Vorteilhaftigkeit des bivalenten Systems gegenüber dem vollständig fossilen Heizsystems nach ca. 4 Jahren. Je nach Gebäude deckte der Spitzenlastkessel zwischen 2,5 % und 5 % des Jahreswärmebedarfs ab, sodass eine Reduktion des Gasverbrauchs zwischen 95 % und 97,5 % erreicht würde. Ausgehend von der Diskussion im Kapitel 7 soll dieses Ergebnis technisch und wirtschaftlich validiert werden.

In der technischen Analyse wurden für die diskutierten Wärmepumpen-Arten die zu erreichenden Jahresarbeitszahlen ermittelt, welche für die spätere Ermittlung des Strom- und Gasbedarfs in der wirtschaftlichen Bewertung benötigt wurden. Es ergaben sich Jahresarbeitszahlen zwischen 2,68 und 4,51. Diese Bandbreite ist durch verschiedene Faktoren zu erklären. Je höher die Wärmequellen-Temperatur, desto größer auch die COP-Werte und damit die SCOP-Werte. Damit ist begründet, dass Wasser-Wärmepumpen mit 10 °C Wärmequellen-Temperatur höhere COP-Werte erreichen, als Luft-Wärmepumpen mit Temperaturen unterhalb der Frostgrenze.

Des Weiteren wurde validiert, dass Wärmepumpen mit hohen Deckungsgraden höhere SCOP-Werte aufweisen, als Wärmepumpen mit niedrigeren Deckungsgraden. Da in der monovalenten Betriebsweise der Deckungsgrad bei 100 % liegt, fällt der SCOP-Werte höher aus, als bei einem bivalenten System mit einem Deckungsgrad kleiner als 100 %. In den analysierten bivalenten Systemen wurden Deckungsgrade zwischen 93 % und 97,5 % erreicht, bei SCOP-Werten zwischen 2,68 und 2,92. Die monovalenten Wärmepumpen Sole und Wasser wiesen SCOP-Werte von 4,06 und 3,98 auf. Diese Werte wurden als realitätsnah validiert.

Als weiterer Analysepunkt wurde die Erschließungsmöglichkeit der Wärmequellen auf dem Mathildenhügel betrachtet. Keine Analyse ergab eine eindeutige Möglichkeit für die Umsetzung. Begründet liegt dies in einer zu großen Differenz zwischen benötigter Freifläche und verfügbarer Freifläche auf den Liegenschaften. Zwar sind Erdwärmesonden nahezu unabhängig von der verfügbaren Fläche, jedoch ergaben sich einzelne Sondentiefen von ca. 1000 m. Dies ergab in der Wirtschaftlichkeitsberechnung eine drei bis viermal höhere Annuität als alle anderen untersuchten Systeme. Für die Nutzung von Grundwasser ergaben sich keine eindeutigen Ergebnisse, da hierfür noch weitere Faktoren betrachtet werden müssen.

In der wirtschaftlichen Betrachtung ergab sich die Vorteilhaftigkeit der Luft-Wärmepumpe im Vergleich zu einer weiteren fossilen Brennstoffnutzung nach 4 Jahren unter den angenommenen technischen und wirtschaftlichen Bedingungen. Die Sole-Wärmepumpe mit Kollektoren war, wie die Luft-Wärmepumpe, nach 4 Jahren insgesamt günstiger, als die Gasheizung. Erdsonden wiesen dreimal höhere Gesamtkosten auf, als die Kollektoren. Dies lag vor allem in den hohen Sondentiefen begründet, sodass die Sonden vom direkten Kostenvergleich ausgeschlossen wurden. Geringere Kosten als die Luft-Wärmepumpe wiesen die Nutzung von

Grundwasserbrunnen auf. Der direkte Vergleich von der Grundwasser-Wärmequelle mit den anderen Wärmequellen ist jedoch nicht eindeutig, da innerhalb der Berechnung der Strom der Förderpumpe und die exakten hydrologischen Bedingungen nicht ermittelt wurden.

10 Literaturverzeichnis

- Ackermann, T (2019). *Energiebedarf versus Energieverbrauch oder Theorie versus Realität. Untersuchungsbericht*. Fachhochschule Bielefeld, Minden. Bauphysik und Baukonstruktion.
- AERMEC S. p. A. (2024). WWB 0330-0900.
- Alphabet Inc. (2024): Google Maps.
- Altieri, L. (2021). *Auslegung und Bewertung von Systemen zur Einbindung regenerativer Wärmequellen in kalte Nahwärmenetze*. Dissertation. Ruhr Universität Bochum, Bochum. Fakultät Maschinenbau.
- Arbeitsgemeinschaft WEG-Mathildenhügel (2024). Treffen der WEG-Mathildenhügel mit der Hochschule Darmstadt.
- Bahlburg, H. & Breitzkreuz, C. (2017). *Grundlagen der Geologie*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H. & Neu, T. (2018). *Handbuch Oberflächennahe Geothermie*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Bauer D., Marx, R. & Drück H. (2012). *Solare Nahwärme im Bestand - Technologie und Perspektiven*. OTTI, Bad Staffelstein. www.igte.uni-stuttgart.de/veroeffentlichungen/publikationen/publikationen_12-07.pdf.
- Bauermann, T., Dullien, S., Martin, C. (2023). *Mit staatlichem Sanierungskapital die Wärmewende unterstützen. Ein Vorschlag für ein neues Instrument, um die Akzeptanz strengerer Heizungsstandards zu erhöhen. IMK Policy Brief 153*. www.boeckler.de/de/faust-detail.htm?sync_id=HBS-008648.
- Becht, A., Diehl, M., Friedrich, R., Fritsche, J.-G., Hergesell, M. & Hoselmann, C. (2017). *Hydrogeologie von Hessen - Odenwald und Sprendlinger Horst*. In Grundwasser in Hessen. Hg. v. Dieter Kämmerer, Angela Prein und Renate Senner. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz Umwelt und Geologie (Grundwasser in Hessen, Heft 2).
- Becker, H. P. & Peppmeier, A. (2018). *Investition und Finanzierung*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Beier, M. (2007). *Urbane Beeinflussung des Grundwassers: Stoffemissionen und -immissionen am Beispiel Darmstadts*. Dissertation. TU Darmstadt, Darmstadt. Material- und Geowissenschaften.
- Bendel, Funtan, Glotzbach, Kirchhof & Klein (2008). Ergebnisse aus dem Projekt OPTINOS. Defizite und Unsicherheiten bei Prüfprozeduren von Photovoltaik-Stromrichtern. *Photovoltaische Solarenergie*, 23.
- Bender, B. & Göhlich, D. (2020). *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 3: Maschinen und Systeme*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Bierschbach, M. (2024): *WWB 0330-0900. Technische Fragen und Kosten*. AERMEC GmbH.
- Bohne, D. (2022). *Gebäudetechnik und Technischer Ausbau von Gebäuden*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Bongs, Wapler, Dinkel, Miara, Auerswald, Lämmle et al. (2023). *LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden*. DOI: 10.24406/publica-1453.
- Bonin, J. (Hg.) (2018): *Wärmepumpen. Fehler vermeiden bei Planung, Installation und Betrieb*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.
- Buderus Thermotechnik GmbH & Co. KG, (2024). *Förderungsaktionen*. Unter Mitarbeit von Buderus Thermotechnik GmbH & Co. KG. www.buderus.de/de/aktuelles/aktionen
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. (2023). *Liste der förderfähigen Wärmepumpen mit Prüf-/Effizienznachweis*. www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/beg_waermepumpen_pruef_effizienz-nachweis.html
- Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz. (2022). *Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW)*. www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMWi/bundesfoerderung-effiziente-waermenetze.html
- Bundesamt für Wirtschaft und Klimaschutz. (2024). *BEG-Programm*. www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/FAQ/FAQ-Uebersicht/BEG/faq-bundesfoerderung-fuer-effiziente-gebaeude.html

Bundesministerium der Justiz. (2023). *Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude-Einzelmaßnahmen (BEG EM)*. www.energiewechsel.de/KAENEFF/Redaktion/DE/FAQ/FAQ-Uebersicht/Richtlinien/bundesfoerderung-fuer-effiziente-gebaeude-beg.html.

Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. (2024). *BWP-Datenbank*. www.waermepumpe.de/presse/referenzobjekte/bwp-datenbank

Clausen, J. & Hinterholzer, S. (2023). *Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern im Bestand*. Borderstep Institut. <https://www.borderstep.de/publikation/clausen-j-hinterholzer-s-2023-waermepumpen-in-mehrfamilienhaeusern-im-bestand-berlin-borderstep-institut/>

Dachroth, W. (2017). *Handbuch der Baugelologie und Geotechnik*. Springer, Berlin Heidelberg.

Day, T. (2006). *Degree-days: theory and application*. The Chartered Institution of Building Services Engineers.

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. (2010). *Empfehlung Oberflächennahe Geothermie. Planung, Bau, Betrieb und Überwachung*. Ernst & Sohn, Berlin.

Diefenbach, N., Cischinsky, H., Rodenfels, M., Clausnitzer, K.-D. (2010). *Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt. www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Endbericht_Datenbasis.pdf.

DIN 4023, *Geotechnische Erkundung und Untersuchung*

DIN EN 12831-1 (2017). *Energetische Bewertung von Gebäuden-Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast- Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3*.

DIN EN 14511-2 (2023). *Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und-kühlung und Prozesskühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern-Teil 2 Prüfbedingungen*.

DIN EN ISO 14688, *Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden*

DIN TS 18599 (2021). *Energetische Bewertung von Gebäuden-Berechnung des Nutz-End- und Primärenergiebedarfs für Heizung Kühlung Lüftung Trinkwasser und Beleuchtung-Teil 12 Tabellenverfahren für Wohngebäude*.

DIN V 18599-2 (2018). *Energetische Bewertung von Gebäuden-Berechnung des Nutz-End- und Primärenergiebedarfs für Heizung Kühlung Lüftung Trinkwasser und Beleuchtung-Teil 2 Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*.

DIN V 18599-1 (2018). *Energetische Bewertung von Gebäuden-Berechnung des Nutz-End- und Primärenergiebedarfs für Heizung Kühlung Lüftung Trinkwasser und Beleuchtung-Teil 1 Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe Zonierung und Bewertung der Energieträger*.

Dötsch, C. Taschenberger, J., Schönberg, I. (1998). *Leitfaden Nahwärme*. Fraunhofer IRB Verlag. Fraunhofer UMSICHT, Stuttgart.

E-Netz Südhessen AG. (2024). *Wärmepumpen, Stromanschluss und Zähler*. www.e-netz-suedhessen.de/bauen-anschiessen/stromanschluss-von-waermepumpen.

Entega Plus GmbH. (2024). *Förderung für energiesparende Geräte. & weitere effiziente Maßnahmen*. www.entega.de/foerdermittel/.

Glaesmann, N. (2022). *Wärmepumpenheizungen. Planungshilfe und Ratgeber für Neubauten und Bestandsgebäuden*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.

Günther, D., Wapler, J., Langner, R., Helmling, S., Miara, M., Fischer, D. et al. (2020). *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt WPsmart im Bestand*. Fraunhofer IRB Verlag. Fraunhofer Institut.

Häfner, F., Wagner, R.-M., Meusel, L. (2015). *Bau und Berechnung von Erdwärmelanlagen*. Springer, Berlin Heidelberg.

Hagedorn, V. (2019). *Wohnquartiere mit einem Niedrig-Temperatur-Wärmenetz*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.

- Hartmann, F. (2006). *Systemtechnik für Wärmepumpen. Solar- und Umweltwärme für Wohngebäude*. Hüthig und Pflaum, Heidelberg.
- Heizungsdiscout 24 GmbH. (2024). *Wärmepumpen Stiebel Eltron, WPL-S 18-47*. www.heizungsdiscout24.de/waermepumpen/stiebel-eltron/wpl-s-18-47/.
- Heße, W. (2020). *Energieeffiziente Wärmeversorgung von Gebäuden*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz (2024). *Geologie Viewer*. geologie.hessen.de/mapapps/resources/apps/geologie/index/.
- Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation. (2024). *Auszug aus dem Liegenschaftskataster*. https://gds.hessen.de/INTERSHOP/web/WFS/HLBG-Geodaten-Site/de_DE/-/EUR/ViewNavigation-Start.
- Hitchin, E.R. (1981). Degree-days in Britain. *Building Services Engineering Research R*, 2, 73–82.
- HLNUG (2024). Naturraum. www.hlnug.de/themen/geologie/geo-info-hessen/geologische-entwicklung-in-hessen/naturraum.
- Hötling B., Coldewey, W. G. (2013). *Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Hoss, F. (2023). *Mein Sanierfahrplan Dieburgerstraße 85-87*. Effizienz Klasse GmbH.
- Jagnow, K., Gebhardt, K., Wolff D. (2023). *Auslegung von Wärmepumpen über Jahresverbrauchsdaten*. www.tga-fachplaner.de/heizungstechnik/heizungswende-energieberatung-20-auslegung-von-waermepumpen-ueber.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (2013). *Erneuerbare Energien*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (2020). *Erneuerbare Energien*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Kempe, S., Engels, P., Henschel, H.-V. (2009). *Darmstadts Unterwelt*. Justus-von-Liebig-Verlag, Darmstadt.
- KfW-Bank. (2024). *Einzelmaßnahmen Ergänzungskredit – Wohngebäude (358, 359)*. [www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestehende-Immobilie/F%C3%B6rderprodukte/Einzelma%C3%9Fnahmen-Erg%C3%A4nzungskredit-Wohngeb%C3%A4ude-\(358-359\)/](http://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestehende-Immobilie/F%C3%B6rderprodukte/Einzelma%C3%9Fnahmen-Erg%C3%A4nzungskredit-Wohngeb%C3%A4ude-(358-359)/).
- Kolb P. (2013). *Energieausweis Lucasweg 6*. Entega Energie GmbH & Co. KG.
- Kolb P. (2015). *Energieausweis Dieburgerstraße 75*. Entega Energie GmbH & Co. KG.
- Konstantin, P. & Konstantin, M. (2022). *Praxisbuch der Fernwärme- und Fernkälteversorgung. Kraft-Wärme- und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Kostenstrukturen und Preisbildung*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Lämmle, M., Wapler, J., Kropp, M., Hess, S., Hahn, D., David, G., Herkel, S. (2019). *Gezielter Heizkörper-Austausch in Wärmepumpen-Heizungsanlagen*. DKV-Tagung. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V. DKV. Ulm, 2019.
- Landes Energie Agentur Hessen GmbH. (2020). *Die Wärmewende voranbringen. Kommunale Wärmeplanung in Hessen gemeinsam gestalten*.
- Landes Energie Agentur Hessen GmbH. (2024). *Kommunale Wärmeplanung / Leitfaden*. www.lea-hessen.de/kommunen/kommunal-waerme-planen/.
- Loga, T. (2003). Heizgrenztemperaturen für Gebäude unterschiedlicher energetischer Standards. Abschätzung der Heizgrenztemperaturen und Bilanzzeiten für das Heizperiodenbilanzverfahren nach EN 832 / DIN V 4108-6. *Bauphysik*, 25, 2–14. DOI: 10.1002/bapi.200300020.
- Markert G. (2018). *Energieausweis Hoetgerweg 10-12*. WWVG Darmstadt.
- Ochsner, K. (2009): *Wärmepumpen in der Heizungstechnik. Praxishandbuch für Installateure und Planer*. C. F. Müller, Heidelberg.
- Pistohl, W. (2013). *Handbuch der Gebäudetechnik. Planungsgrundlagen und Beispiele*. Werner, Düsseldorf.
- Rumohr, S., Hoffmann, M., Fechter, N. (2017). *Erdwärmennutzung in Hessen. Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen*. Hessisches Landesamt für Naturschutz Umwelt und Geologie (HLNUG).

- Schuster, T. & Rüdert von Collenberg, L. (2017). *Investitionsrechnung: Kapitalwert, Zinsfuß, Annuität, Amortisation*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Schwarz, A. (2022a). *Mein Sanierungsfahrplan. Fiedlerweg 24-30 Haus B*. EC0texturplan.
- Schwarz, A. (2022b). *Mein Sanierungsfahrplan. Fiedlerweg 24-34 Haus A*. EC0texturplan.
- Schwarz, A. (2022c). *Mein Sanierungsfahrplan. Fiedlerweg 24-34 Haus C*. EC0texturplan.
- Seifert, H.-J. (2023). *Wärmepumpen für Heizung und Warmwasser*. Stiftung Warentest, Berlin.
- Setwin, R. (2024). *Technische und Wirtschaftliche Fragen Logatherm WPS-HT*. Buderus Thermotechnik GmbH & Co. KG.
- Stiebel Eltron GmbH & Co. KG. (2024). *Stiebel-Eltron-Luft-Wasser-Waermepumpe-WPL-S-47-HK-400-Premium. Technisches-Datenblatt*.
- Stober, I. & Bucher, K. (2012). *Geothermie*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Tiator, I. & Schenker, M. (2013). *Wärmepumpen Wärmepumpenanlagen*. Vogel Buchverlag.
- Uebers, S. (2023). *Wasserbilanz Rhein-Main 2022*. Regierungspräsidium Darmstadt.
- VDI 2067-1 (2012). Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.
- VDI 3087-1 (2013). *Verbrauchskennwerte für Gebäude*.
- VDI 4640-1 (2019). *Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte*.
- VDI 4640-2 (2019). *Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*.
- VDI 4645. *Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein-/ und Mehrfamilienhäusern – Planung, Errichtung, Betrieb*
- VDI 4650-1 (2019). *Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen*.
- Verivox GmbH. (2024). *Heizstrom – Tarifvergleich*. Online verfügbar unter www.verivox.de/heizstrom/vergleich/
- Viessmann Werke (2011). *Planungshandbuch Wärmepumpen*.
- Wisotzky, F., Cremer, N., Lenk, S. (2018). *Angewandte Grundwasserchemie, Hydrogeologie und hydrogeochemische Modellierung*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Wissenschaftsstadt Darmstadt. (2020). Entwurf zum Bebauungsplan O 32 - Mathildenhöhe - Ost. darmstadt.gremien.info/vorlagen_details.php?vid=20201210100306