



BEISSEL & RUPPERT
ENGINEERING AND CONSULTING



AMSTEIN + WALTHERT

Administration Communale de Strassen

Energiekonzept Stroossen 2030 Abschlussbericht

Version 0 - 15.08.2024



Revision	Datum	Visa	Beschreibung
0	15.08.2024		Erstellung Dokument



INHALTSVERZEICHNIS

1 ZIELSETZUNG	5
1.1 AUSGANGSLAGE	5
1.2 AUFGABENBESCHRIEB UND ZIELE	5
2 GRUNDLAGEN	6
2.1 PERIMETER / ÜBERSICHT	6
2.2 SCHNITTSTELLEN	8
2.3 DOKUMENTE	8
3 ENERGIE-ANALYSE	9
3.1 ENERGIE- UND LEISTUNGSBEDARF GEBÄUDE	9
3.2 TEMPERATURBEDARF BESTANDSGEBÄUDE	13
3.3 ENERGIEANGEBOT	14
3.3.1 BIOMASSE	14
3.3.2 ERDWÄRME	14
3.3.3 AUSSENLUFT	14
3.3.4 SOLARENERGIE	15
3.3.5 AUSGESCHLOSSENE ENERGIETRÄGER	15
4 KONZEPTENTWICKLUNG	16
4.1 VARIANTE 1.1 – DEZENTRALE LUFT/WASSER-WÄRMEPUMPEN	16
4.2 VARIANTE 2 – ZENTRALE WÄRMEPUMPE MIT ERDWÄRMESONDEN	17
4.2.1 VARIANTE 2 – EWS MIT ZENTRALER WÄRMEPUMPE	20
4.2.2 VARIANTE 2.1 – EWS MIT ZENTRALER WÄRMEPUMPE – ERHÖHTE REGENERATION	20
4.3 VARIANTE 2.2 – EWS MIT ZENTRALER WÄRMEPUMPE OPTIMIERT	21
4.4 VARIANTE 3 – ZENTRALE HOLZPELLET-FEUERUNG	21
5 STANDORTE ENERGIEZENTRALE	23
6 ÖKOLOGISCHE BETRACHTUNG	24
6.1 ENDENERGIEZUSAMMENSTELLUNG	24
6.2 TREIBHAUSGASEMISSIONEN	24
7 WIRTSCHAFTLICHKEIT	26
7.1 ABGRENZUNG INVESTITIONSKOSTEN	26
7.2 PARAMETER WIRTSCHAFTLICHKEITSRECHNUNG	27
7.3 INVESTITIONSKOSTEN	27
7.4 MITTLERE JAHRESKOSTEN UND ENERGIEGESTEHUNGSKOSTEN	28
7.5 FÖRDERMÖGLICHKEITEN	30
7.6 SENSITIVITÄT ENERGIEKOSTEN	31
8 ZUSAMMENFASSUNG	32
8.1 FAZIT UND EMPFEHLUNG	32
8.2 WEITERES VORGEHEN	33
9 ANHANG	34



9.1	VERZEICHNISSE	34
9.2	ENERGIE- UND LEISTUNGSBEDARF DER GEBÄUDE	35
10	BEILAGEN	37
10.1	ALLGEMEIN	37
10.2	HLK	37



1 ZIELSETZUNG

1.1 AUSGANGSLAGE

Die Gemeinde Strassen liegt westlich der Stadt Luxemburg und erfährt seit 2008 einen stetigen Bevölkerungszuwachs. Die Neugestaltung des Zentrums der Gemeinde erfolgt auf Basis des Masterplans «Stroossen 2030». Auf dem Areal befinden sich hauptsächlich gemeindeeigene Gebäude wie Schulen, Sporthallen, die Gemeindeverwaltung und Kulturgebäude. Ebenfalls sind Neubauten angedacht. Die Entwicklung hat im Süden des Areals bereits begonnen, auch für die neuen Schul- und Sportgebäude wurde die Planung gestartet.

Die bestehenden Gebäude werden aktuell über ein Fernwärmenetz mit zentralen Gasfeuerungen beheizt. Da die Wärmeerzeugung bis im Jahr 2035 ohne fossile Brennstoffe erfolgen soll, ist der Anschluss der Neubauten an das bestehende Fernwärmenetz keine Option. Die Energieversorgung muss daher neu gedacht werden. Eine Machbarkeitsstudie zur zukünftigen Energieversorgung wurde bereits im Jahr 2021 gestartet, dann aber unterbrochen und nun im Jahr 2024 mit aktualisierten Grundlagen wieder aufgenommen und abgeschlossen.

1.2 AUFGABENBESCHRIEB UND ZIELE

Für das Areal soll ein Energiekonzept erstellt werden, welches sowohl die bestehenden Gebäude als auch die angedachten Neubauten berücksichtigt. Dabei ist das bereits bestehende Fernwärmenetz zu berücksichtigen. Es ist ein möglichst hoher Anteil an erneuerbaren Energien für die Deckung des Energiebedarfs einzusetzen. Der Energiebedarf soll durch den Einsatz von effizienten Systemen zudem auf ein Minimum beschränkt werden.

Folgende Punkte werden im Rahmen der Machbarkeitsstudie betrachtet:

- Energie- und Leistungsbedarf im Perimeter (Wärme, Kälte und Strom)
- Energieangebot im Perimeter
- Ausarbeitung möglicher Versorgungsvarianten
- Bewertung der Versorgungsvarianten und Auswahl der zu vertiefenden Varianten
- Grobdimensionierung der Komponenten
- Kostenschätzung
- Wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich der Varianten
- Empfehlung zum weiteren Vorgehen

2 GRUNDLAGEN

Die folgenden Grundlagen bilden die Basis für Analyse und Konzeptbildung und ist auf die Zielsetzung ausgerichtet.

2.1 PERIMETER / ÜBERSICHT

Die folgende Abbildung stellt den Projektperimeter dar. Das Energiekonzept bezieht sich primär auf die verschiedenen Schulgebäude, das Verwaltungsgebäude sowie die geplanten Neubauten.



Abbildung 1 Projektperimeter (Grundplan: Masterplan Strassen 2030)



Der Projektperimeter umfasst folgende Gebäude:

Tabelle 1 Gebäude im Projektperimeter

Gebäude	Entwicklung
Gemeindehaus	Ausbau; Inbetriebnahme (IBN) im Jahr 2028
Grundschule (Ecole Fondamental C4)	Neubau; IBN im Jahr 2030
Kindertagesstätte inkl. Schulkantine «Am Kaer»	Neubau; IB; im Jahr 2028
Sporthalle	Neubau; IBN im Jahr 2028
Kommunale Ateliers	Abbruch im Jahr 2030
Jugendtreff	Neubau; IBN im Jahr 2027
Kulturzentrum Barblé	Bestand
Kinderkrippe Wibbeldewapp	Separate Machbarkeitsstudie (MBS) läuft
Sporthalle «Ancient» und «Nouveau»	Bestand
Feuerwehrdepot	Abbruch im Jahr 2030
Kindergarten und Schule Hueflach	Bestand
Schulhaus Blummewiss	Bestand
Schulhaus Ben Heyart	Bestand
Schulprovisorium	Bestand

Nicht direkt im Projektperimeter aber über den bestehenden Wärmeverbund erschlossen sind folgende weiteren Gebäude:

Kirche

- Maison Relais Martyrs
- Centre Paroissial
- Résidence Romains
- Centre Médical
- Résidence Borie
- Résidence Strata
- Résidence FdL



2.2 SCHNITTSTELLEN

Folgende Schnittstellen sind bekannt und für das Projekt relevant.

Tabelle 2 Schnittstellen zu laufenden Projekten

Projekt	Schnittstelle	Zeitpunkt
Planung Kindertagesstätte «Am Kaer»	Wärme-/Kälteversorgung	MBS läuft
Planung neue Sporthalle	Wärme-/Kälteversorgung	Vorprojekt läuft
Bestehender Wärmeverbund	Nutzung best. Netz	Zu definieren
MBS Sanierung Kinderkrippe Wibbeldewapp	Änderung im Wärme- und Kältebedarf	MBS läuft

2.3 DOKUMENTE

Folgende Dokumente bilden die Grundlage für das Energiekonzept:

Energiekonzept für die kommunalen Einrichtungen und Ausrüstungen der Gemeinde Strassen –
 Untersuchung im Rahmen des Klimapakts, Simon-Christiansen & Associés S.A., 2020
 Masterplan für Projekt «Strassen 2030», Luxplan S.A., Stand 21.12.2022 inkl. Angaben zu
 Geschossflächen und Erstellungsjahr



3 ENERGIE-ANALYSE

3.1 ENERGIE- UND LEISTUNGSBEDARF GEBÄUDE

Der angenommene Energiebedarf der Bestandsgebäude entspricht dem durchschnittlichen Wärmebedarf der Gebäude aus den Jahren 2012 bis 2018 gemäss Angaben im Dokument Energiekonzept Strassen¹. Diese Daten liegen als Jahreswerte vor.

Darin enthalten ist ebenfalls die installierte Leistung der Übergabestationen, Leistungsmessungen liegen aber nicht vor. Aufgrund der daraus resultierenden Volllaststunden scheinen diese zum Teil deutlich überdimensioniert zu sein:

Tabelle 3 Gebäudedaten Bestand

	Baujahr	Durchschnittlicher Energiebedarf [MWh/a]	Installierte Leistung Übergabestation [kW]	Volllaststunden
Gemeindeverwaltung	1973	427	300	1'423
Kulturzentrum Paul Barblé	1999	352	250	1'408
Kindergarten + Primarschule Hueflach	1992	507	300	1'690
Primarschule Ben Heyart	2009	190	205	927
Primarschule Blummewiss	2006	122	120	1'017
Maison Relais 57	Vor 1900	68	40	1'700
Kinderkrippe Wibbeldewapp	1999	99	66	1'500
Schulcontainer	2020	194	40	4'850
Alte Sporthalle	1983	239	400	598
Neue Sporthalle	2007	204	120	1'700
Kommunale Ateliers	1990	289	140	2'064
Interventionszentrum	1998	79	35	2'257

Ausser für die Kinderkrippe Wibbeldewapp sind keine geplanten Sanierungen bekannt. Die Machbarkeitsstudie für die Sanierung ist noch nicht abgeschlossen.

Für die Gebäude mit Baujahr vor 2000 ist, abhängig von der Nutzung im Gebäude, von ca. 2'000 Volllaststunden oder mehr auszugehen. Bei den meisten Gebäuden ist die Anzahl der Volllaststunden kleiner. Auch bei den neueren Gebäuden sind 1'000 Volllaststunden eher tief. Die Energie- und Leistungszahlen des Schulcontainers sind mit 4'850 Volllaststunden nicht plausibel.

Dass Übergabestationen grösser ausgelegt werden, ist zum Teil gewollt, da die Mehrkosten für eine grössere Station klein sind und der tatsächliche Bedarf in den Gebäuden oft nicht genau bekannt ist. Da die neue Erzeugung möglichst nicht überdimensioniert werden soll, wird der Leistungsbedarf der Gebäude über den Energiebedarf und Kennwerte neu abgeschätzt.

Der Wärmebedarf wurde auf Heizwärme und Brauchwarmwasser aufgeteilt. Dazu wurde mithilfe der Nettogeschosfläche und dem spezifischen Brauchwarmwasserbedarf für Bestandsgebäude basierend auf Kenngrössen² der Warmwasserbedarf je Gebäude abgeschätzt. Der restliche Energiebedarf wurde der Heizwärme zugeteilt. Der Leistungsbedarf wurde anhand von Volllaststunden berechnet. Für Schule und Verwaltung wurden 2'000 Volllaststunden für den

¹ Energiekonzept für die kommunalen Einrichtungen und Ausrüstungen der Gemeinde Strassen – Untersuchung im Rahmen des Klimapakts, Simon-Christiansen & Associés S.A., 2020

² gemäss Merkblatt SIA 2024:2015 «Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik»



Gesamtwärmeverbrauch angenommen. Für die beiden neueren Gebäude Ben Heyart und Blummewiss wurde mit 1'500 Volllaststunden gerechnet.

Der Energie- und Leistungsbedarf der Neubauten wurde über die SIA 2024:2015 «Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik» abgeschätzt. Die dazu notwendigen Flächenangaben stammen aus dem Plan «Masterplan – Stroossen 2030» vom 21.11.2019.

Eine Zusammenstellung der Energie- und Leistungsdaten je Gebäude befindet sich in Anhang Kapitel 9.2.

Für den bestehenden Wärmeverbund wurde abgeschätzt, wie sich der Wärmebedarf in den nächsten Jahren entwickeln würde, wenn die Neubauten über das bestehende Netz mitversorgt werden (vgl. **Abbildung 2**). Der Bedarf würde zwischen 2028 bis 2030 steigen, bevor dann im Jahr 2030 mit den Ateliers ein Teil des Bedarfs wegfällt. Insgesamt bleibt der Wärmebedarf voraussichtlich relativ konstant bei rund 3'750 MWh/a.

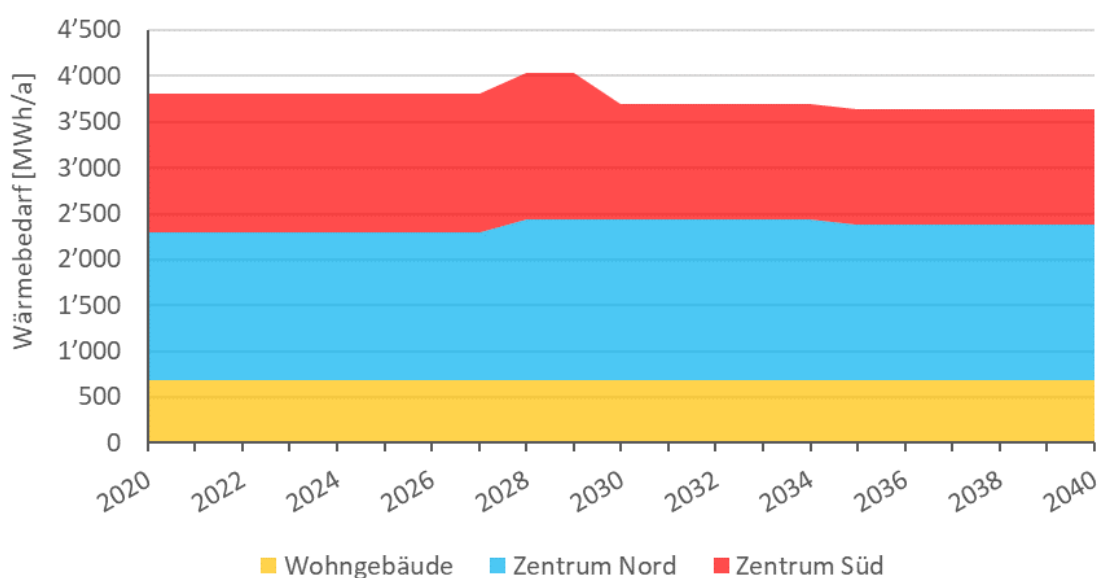


Abbildung 2 Entwicklung Wärmebedarf des Verbundes

Der Energiebedarf wurde pro Gebäude für das Areal dargestellt. Die grossen Wärmebezügler sind die Schule Hueflach, das Gemeindehaus und das Kulturzentrum Barblé (vgl. **Abbildung 3**).

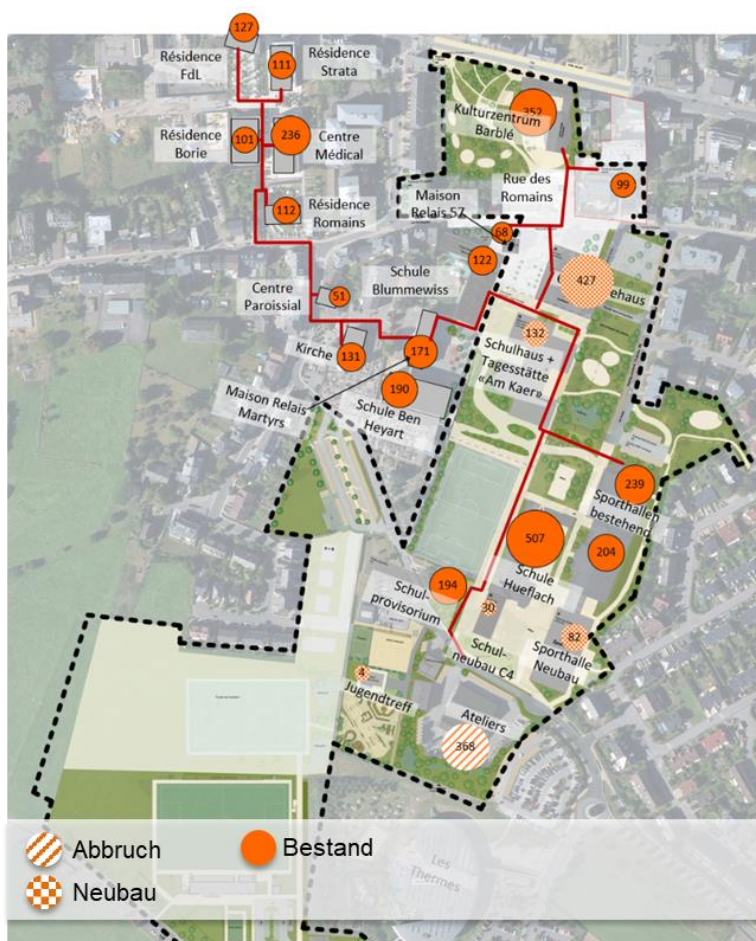


Abbildung 3 Wärmeenergiebedarf der Gebäude [MWh/a]

Für die Gebäude im Perimeter wurde neben dem Wärmebedarf auch der Kälte- und Strombedarf abgeschätzt. Während der Energiebedarf für Wärme langfristig trotz zunehmender Nettogeschossfläche tendenziell abnimmt, nehmen der Strom- und Kältebedarf zu (vgl. **Abbildung 4**).

Mit rund 2'500 MWh/a werden ca. zwei Drittel der Wärme des Verbunds im Perimeter benötigt. Der Klimakältebedarf wird relativ tief geschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass nur die Neubauten einen Kältebedarf aufweisen werden, wobei Sporthallen³ normalerweise keinen Kältebedarf aufweisen. Nicht enthalten ist Prozesskälte, zum Beispiel für Kühlräume in der Küche der Schulkantine. Für Bestandsgebäude wurde kein Kältebedarf hinterlegt. Je nach Wärmeabgabesystem im Gebäude ist eine Kühlung im Sommer nicht ohne grössere Umbauten möglich.

³ Entsprechend Merkblatt SIA 2024

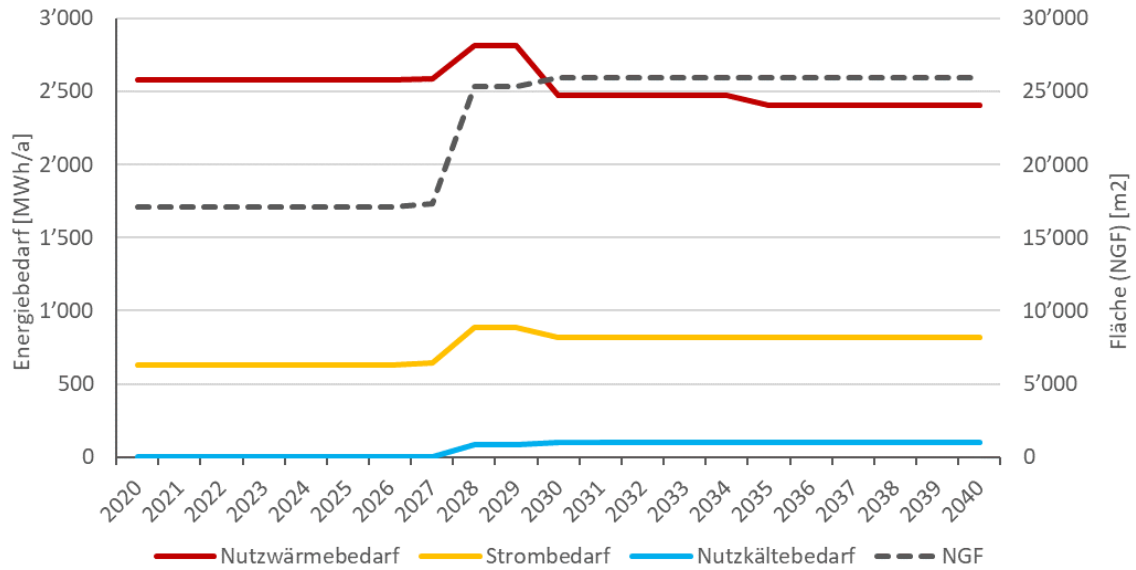


Abbildung 4 Entwicklung Energiebedarf im Perimeter

Die Neubauten haben im Vergleich zu den Wegfallenden Bestandsgebäuden ein anderes Verhältnis zwischen Energie- und Leistungsbedarf in der Wärmebereitstellung (tiefere Vollaststunden). Durch den Wegfall der Ateliers wird der zusätzliche Wärmeenergiebedarf der Neubauten überkompensiert. Beim Leistungsbedarf ist dies nicht der Fall. Daher wird der Leistungsbedarf für Wärme, Kälte und Strom in Zukunft zunehmen.

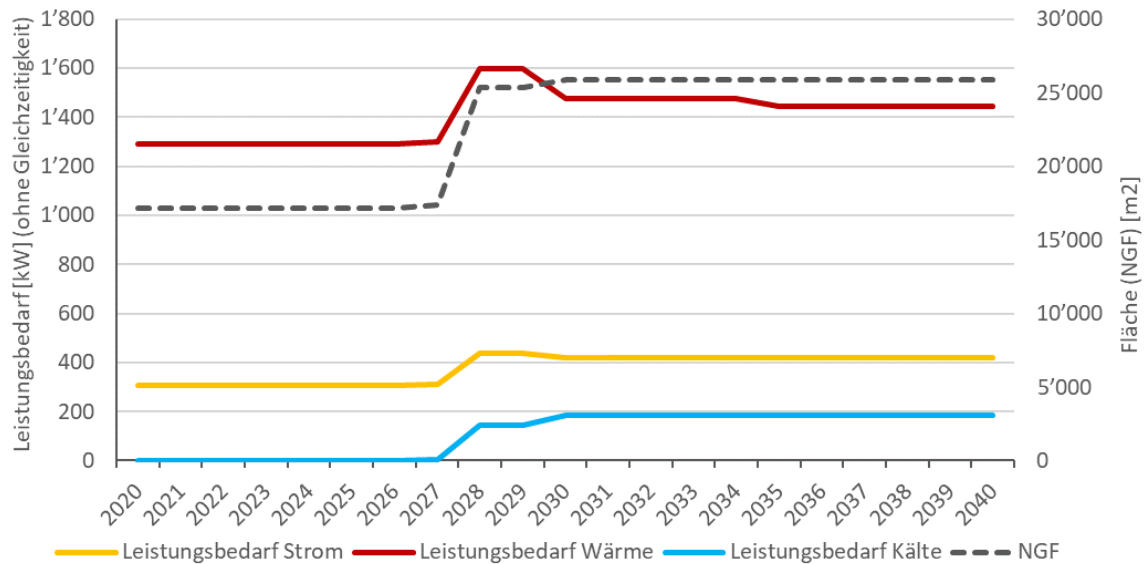


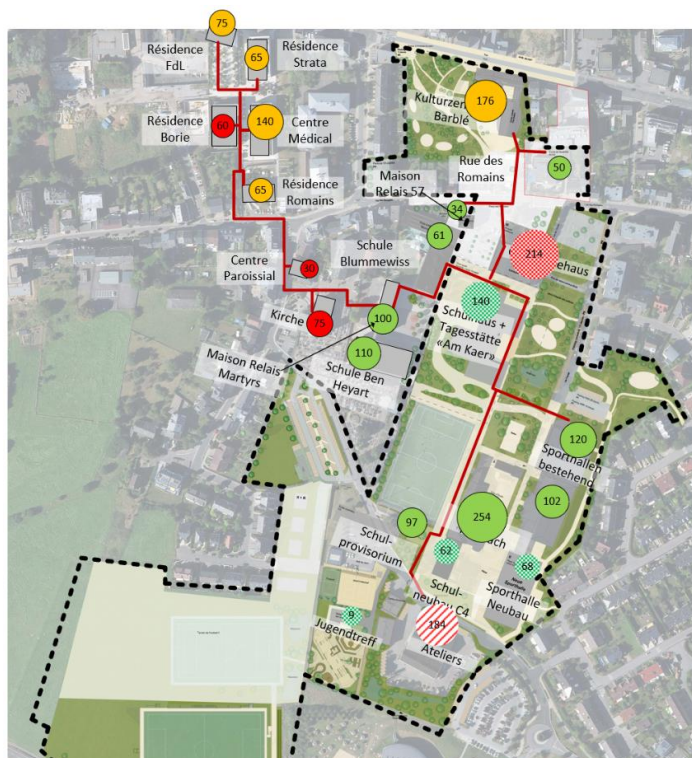
Abbildung 5 Entwicklung Leistungsbedarf im Perimeter



3.2 TEMPERATURBEDARF BESTANDSGEBÄUDE

Das bestehende Wärmenetz wird mit Temperaturen von 85°C im Vorlauf und 65°C im Rücklauf betrieben. Diese Temperaturen sind für Wärmepumpen ungünstig, da ein höherer Temperaturhub eine tiefere Effizienz und einen höheren Strombedarf bedeutet. Deswegen wurde untersucht, welche Temperaturen in den Gebäuden tatsächlich benötigt werden und ob die Vorlauftemperatur gesenkt werden kann.

Dazu wurde am 12.01.2024 bei den Gebäuden an den Heizverteiltern in den Gebäuden abgelesen, mit welchen Temperaturen die Gebäudeverteilung tatsächlich versorgt wird. Die Resultate sind in **Abbildung 6** zusammengefasst.



Dunkelgrün schraffiert: Neubauten;
Es ist anzunehmen, dass diese mit grossflächigen Abgabesystemen geplant werden und somit ein tiefer Temperaturbedarf zu erwarten ist.

Hellgrün: Die Ablesung hat in den Heizgruppen Temperaturen tiefer als 60°C gezeigt.

Orange: Die Ablesung hat in den Heizgruppen Temperaturen zwischen 60°C und 68°C gezeigt.

Rot: Die Ablesung hat in den Heizgruppen Temperaturen höher als 68°C gezeigt.

Abbildung 6 Temperatur- und Leistungsbedarf der Gebäude

Die Wohngebäude im Norden des Netzes benötigen tendenziell höhere Temperaturen, ebenso die Kirche und das Centre Paroissial. Im Versorgungssperimeter ist vor allem das Kulturzentrum Barblé mit hohen Vorlauftemperaturen in den Heizgruppen und der Lüftung aufgefallen. Beim Gemeindehaus wurden ebenfalls sehr hohe Temperaturen gemessen, allerdings ist unklar, wie die Heizverteilung im Gebäude aufgebaut ist. Die Ateliers im Süden des Perimeters wurden nicht abgelesen, da sie im Jahr 2030 abgerissen werden sollen.

Im Netz ist mit Temperaturverlusten von ca. 3 bis 4°C zu rechnen. Die Vorlauftemperatur bei der Erzeugung muss dementsprechend höher sein. Zusätzlich kommt es an den Übergabestationen zwischen dem Wärmenetz und der Gebäudeverteilung zu einem weiteren Temperaturverlust (Grädigkeit) von mind. 2°C. Um das Brauchwarmwasser über das Fernwärmenetz erzeugen zu können, müssen 60°C bei den Gebäuden sicher erreicht werden, was bei der Erzeugung Vorlauftemperaturen von mindestens 66°C voraussetzt.

Eine Versorgung des Wärmenetzes mit Wärmepumpen ist möglich. Um die Effizienz des Systems zu steigern, sollten die Temperaturen in den Bestandsgebäuden reduziert werden. Dazu müssen diese systematisch untersucht und optimiert werden. Zum Teil ist es unklar, ob die gemessenen Temperaturen tatsächlich im Gebäude benötigt oder dort weiter runtergemischt werden. Auch ist die eingestellte Soll-Temperatur oft nicht die benötigte Minimaltemperatur und kann ohne Komfortverluste reduziert werden.

3.3 ENERGIEANGEBOT

3.3.1 Biomasse

Die verfügbare Biomasse in Form von Holzschnitzeln ist in der Umgebung von Strassen stark beschränkt und nicht ausreichend, um den Wärmeverbund zu betreiben⁴. Es gibt eine grosse Holzpellet- Fabrik, von welcher Pellet für den Wärmeverbund bezogen werden können.

Ein Konzept zur Versorgung des gesamten Areals mit Holzpellet ab einer Zentrale im Südosten des Perimeters wurde durch Simon-Christiansen & Associés S.A bereits im Jahr 2020 erarbeitet, aber später verworfen. Grund dafür waren unter anderem Medienberichte aus den letzten Jahren, dass Holzpellet zum Teil aus nicht nachhaltigen Quellen stammen und die benötigte lange Erschliessungsleitung durch das gesamte Areal.

Die Möglichkeit einer kleineren Holzpellet-Zentrale wird trotzdem geprüft. Sollte die Variante empfohlen werden, wäre beim Einkauf der Holzpellet darauf zu achten, dass eine nachhaltige Holzherkunft garantiert werden kann.

3.3.2 Erdwärme



Abbildung 7 Beschränkungen Erdwärmesonden-Bohrungen (map.geoportail.lu, Juni 2021)

Die Zulässigkeit von Erdwärmesonden im Perimeter wurde durch Beissel & Ruppert beim AGE (Administration de la Gestion de l'Eau) abgeklärt. Da sich im Gebiet ein wichtiges Grundwasservorkommen zur Trinkwassergewinnung befindet, ist die Länge der Erdwärmesonden auf 70 m beschränkt⁵.

3.3.3 Aussenluft

Die Wärmeerzeugung über Aussenluft ist möglich, im Winter wegen der tiefen Temperaturen aber ineffizienter.

Ebenfalls ist eine Kombination von Erdwärme und Aussenluft denkbar, so dass im Winter die wärmeren Erdwärmesonden als Quelle dienen und im Sommer und der Übergangszeit bei warmen Aussentemperaturen gewechselt werden kann.

⁴ Simon-Christiansen & Associés S.A., 2020 ; Der Verkauf von Energieholz an Dritte müsste gestoppt und ein Teil des Industrieholzes als Energieholz genutzt werden, um ca. 35 bis 40% des Wärmebedarfs des bestehenden Verbundes decken zu können.

⁵ Besprechungsbericht 1 – Energiekonzept Strassen vom 28.11.2023; F. Pansin von Beissel & Ruppert



3.3.4 Solarenergie

Zur Unterstützung der Wärmeerzeugung kann Solarenergie eingesetzt werden, entweder thermisch mittels Solarthermie oder elektrisch mittels Photovoltaik (PV). Mit der Solarthermie kann im Sommer mindestens ein Teil des Brauchwarmwassers abgedeckt werden. Die Solarthermie steht aufgrund des Platzbedarfs in direkter Konkurrenz zur Photovoltaik. Der erzeugte Solarstrom kann beim Einsatz von Wärmepumpen für deren Betrieb eingesetzt werden und einen Teil des Gebäudestrombedarfs decken.

3.3.5 Ausgeschlossene Energieträger

Die fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl wurden ausgeschlossen, da diese für die Versorgung der Gemeindegebäude in absehbarer Zukunft nicht mehr verwendet werden können.

Biogas und Fernwärme wurden aufgrund des fehlenden Angebots ebenfalls ausgeschlossen.

Die Nutzung der Abwärme des nahegelegenen Schwimmbads «Les Thermes» wurde geprüft. Es handelt sich um ein interkommunales Schwimmbad, was die Abwärmenutzung durch die Gemeinde Strassen rechtlich schwierig gestaltet. Die abgeschätzte anfallende Abwärme ist im Vergleich zum Wärmebedarf des Areals klein ($< 10\%$). Die Abwärmenutzung sollte zudem sinnvollerweise direkt im Schwimmbad erfolgen. In der Projektsitzung vom 15.11.2023 wurde deshalb beschlossen, die Abwärmenutzung nicht weiter zu verfolgen.

4 KONZEPTENTWICKLUNG

Auf Basis des Energiebedarfs und -angebots aus **Abbildung 4** und **Abbildung 5** wurden verschiedene Varianten ausgearbeitet:

Variante 1.1: Dezentrale Luft/Wasser-Wärmepumpe für jedes Gebäude

Variante 1.2: Dezentrale Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Eisspeichern für die Neubauten

Variante 2: Zentrale Wärmepumpe mit Erdwärmesonden

Variante 2.1: Zentrale Wärmepumpe mit Erdwärmesonden und der Nutzung von Aussenluft

Variante 3: Zentrale Holzpellet-Feuerung

In der Besprechung vom 13.12.2023 wurde entschieden, die Variante 1.2 nicht vertieft zu betrachten. Die anderen Varianten sind in den folgenden Unterkapiteln kurz beschrieben.

4.1 VARIANTE 1.1 – DEZENTRALE LUFT/WASSER-WÄRMEPUMPEN

In dieser Variante wird für jedes Gebäude eine eigene Luft/Wasser-Wärmepumpe installiert. Das Fernwärmenetz könnte ca. im Jahr 2030 rückgebaut werden. Diese Variante dient als Referenz für die weiteren betrachteten Varianten. Für die Bestandsgebäude wurde nicht eingehend geprüft, wie die technische Machbarkeit bezüglich Aufstellung und Platzverfügbarkeit aussieht.

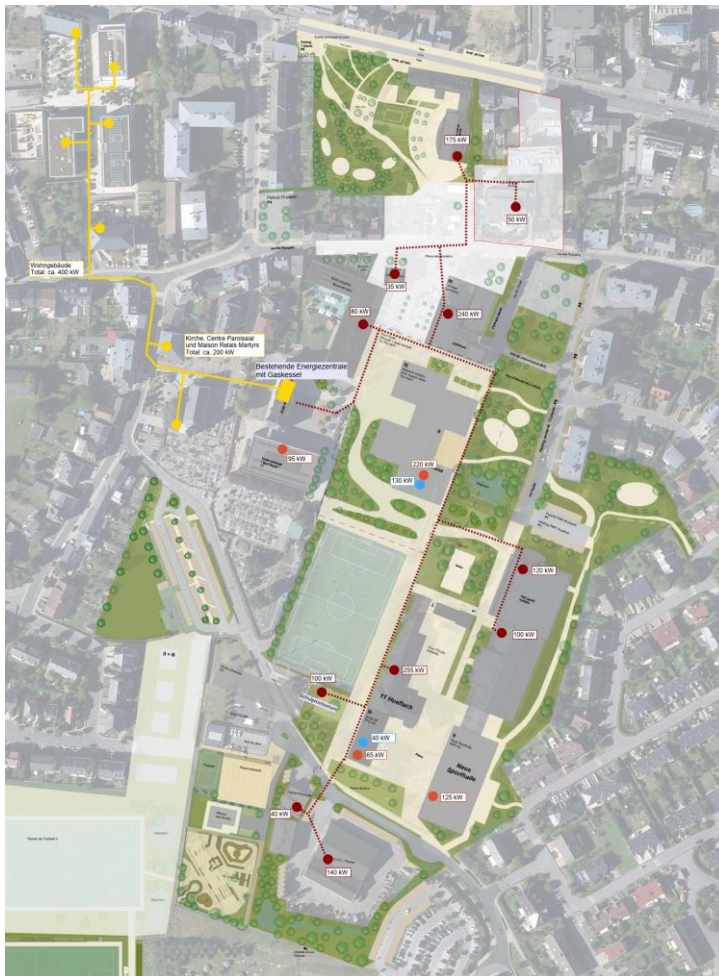


Abbildung 8 Konzept Variante 1.1 – Dezentrale Luft/Wasser-Wärmepumpen

Für die Umsetzung der Variante müssten insgesamt 16 neue Wärmepumpen in verschiedenen Leistungsbereichen und für unterschiedliche Temperaturanforderungen installiert werden. Vor allem die hohen Leistungen im Bestand (5 Wärmepumpen grösser 100 kW) dürften in Realität

schwierig zu realisieren sein. Bei tiefen Aussentemperaturen im Winter werden hohe Stromleistungen benötigt. Ausserdem ist die Lärmbelastung durch die grosse Anzahl an Wärmepumpen an einem sensiblen Standort mit Schulgebäuden zu beachten.

Positiv zu bewerten sind die tieferen Investitionskosten und die Möglichkeit, dass für jedes Gebäude die Temperaturen individuell auf dem benötigten Niveau bereitgestellt werden können. Das heisst für Neubauten können die Temperaturen reduziert werden. Auch ist der Umbau der Wärmeerzeugung so flexibel möglich. Im Sommer könnten die Gebäude zudem aktiv gekühlt werden.

4.2 VARIANTE 2 – ZENTRALE WÄRMEPUMPE MIT ERDWÄRMESONDEN

Für Variante 2 wurde neben der Hauptvariante zwei kostenoptimierte Untervarianten betrachtet. In einem ersten Schritt wurde über Kennwerte zur EWS-Entzugsleistung das vorhandene Potenzial im Perimeter und die ungefähr benötigte Anzahl an EWS für die Versorgung des Perimeters bestimmt.

Als Standorte für die EWS kommen hauptsächlich die Flächen unter den Neubauten in Frage (vgl. **Abbildung 9**). Dort können die EWS erstellt werden ohne spätere Bauprojekte zu beeinträchtigen. Die meisten Flächen sind klein und bieten nur Platz für wenige Sonden. Bei der Erstellung unter den Gebäuden muss zudem beachtet werden, dass mit jedem Untergeschoss des Gebäudes die Länge der EWS abnimmt, da diese nur eine Länge von 70 Meter ab der Bodenoberfläche haben dürfen. Um das Potenzial zu erhöhen, wurde auch der Platz unter dem Kunstrasenplatz abgeschätzt. Dieser muss ca. alle zehn Jahre ersetzt werden was das nächste Mal voraussichtlich im Jahr 2030 der Fall sein wird. Zu diesem Zeitpunkt könnten auch EWS darunter erstellt werden.

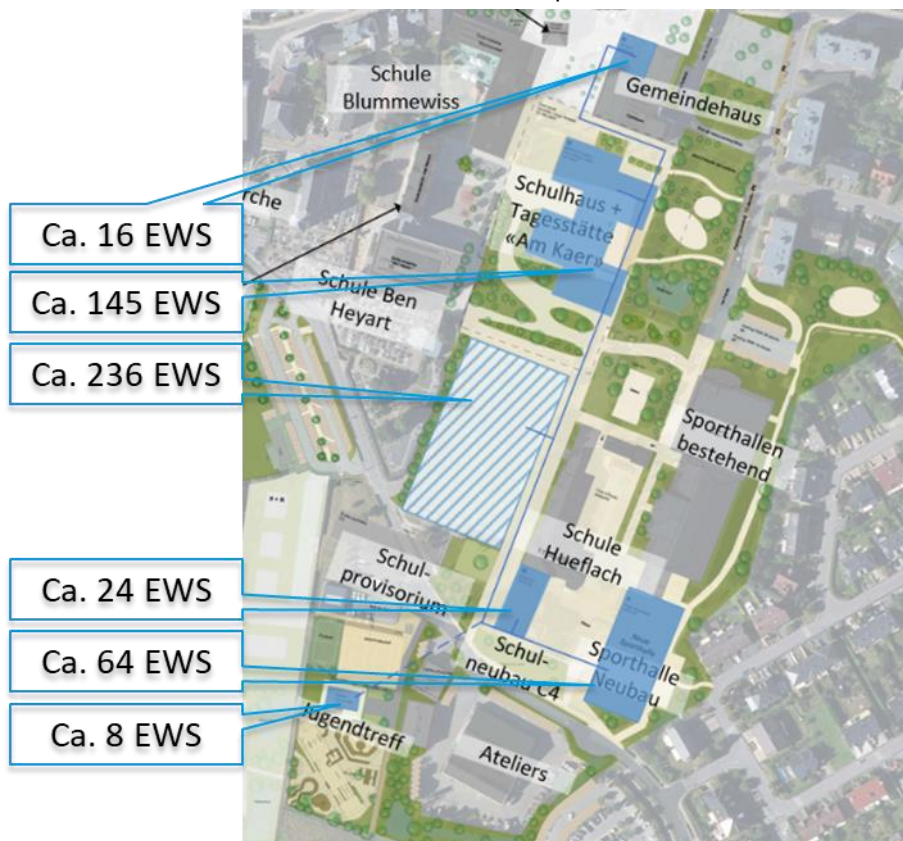


Abbildung 9 EWS-Potenzial im Perimeter

Werden die Sonden mit einem minimalen Abstand von fünf Metern gebohrt, können ca. 490 Sonden erstellt werden. Mit einer durchschnittlichen Entzugsleistung von 35 W/m entspricht dies einer möglichen Quellenleistung von 1.2 MW. Mit einem angenommenen COP der Wärmepumpe von 4 entspricht das ca. einer Wärmeleistung von 1.6 MW.

Der Wärmebedarf im Perimeter wird im Endausbau auf 1.5 MW geschätzt. Unter Berücksichtigung eines Gleichzeitigkeitsfaktors (GZF) von 0.85, da nicht alle Gebäude gleichzeitig die maximale Leistung beziehen, muss die Wärmepumpe maximal 1.3 MW bereitstellen. Die benötigte Quellenleistung liegt entsprechend bei rund 975 kW, was 410 Erdwärmesonden entspricht.

Um die EWS mit einer zentralen Wärmepumpe nutzen zu können, müssen diese über eine Leitung mit tiefen Temperaturen (Anergie-Leitung) mit der Wärmepumpe verbunden sein. Es ist deshalb wirtschaftlicher, die grossen Felder im Zentrum des Perimeters zu erstellen und die kleinen Flächen wie beim Jugendtreff wegzulassen. Unter Berücksichtigung der Flächen unter den Pausenplätzen der Kindertagesstätte sind die zwei grossen EWS-Flächen ausreichend, um den Bedarf des Perimeters zu decken. Um die weiteren Gebäude am bestehenden Fernwärmenetz (gelb in **Abbildung 9**) zu versorgen, ist die Leistung der EWS voraussichtlich nicht ausreichend.

Die Sonden müssen regeneriert werden, d.h. die Wärme, welche in der Heizperiode entzogen wird, muss im Frühjahr und Sommer wieder in das Erdreich eingespeist werden. Ansonsten würden die Sonden zu stark auszukühlen und es würde zu Eisbildung und einer Beschädigung der Sonden kommen.

Da nur ein geringer Kältebedarf auf dem Areal vorhanden ist, welcher für die Regeneration genutzt werden kann, müssen die Sonden zusätzlich aktiv regeneriert werden. Dies kann über Luftwärmetauscher oder Solarkollektoren erfolgen. Um die benötigte Energie und Leistung zur Regeneration der Sonden zu bestimmen, wurde das System mit dem Programm Geowattcore simuliert. Der Bericht dazu wird als Beilage abgegeben.

Für die Energiezentrale wurde der Platzbedarf anhand einer Grobdisposition abgeschätzt (vgl. **Abbildung 10**). Die Zentrale besteht hauptsächlich aus zwei separaten Maschinenräumen für die Wärmepumpen sowie einem Raum für die weiteren technischen Anlagen wie Speicher, Expansionsanlage und Pumpen. Ausserdem sind ein Raum für die Elektroinstallationen, ohne neue Trafostation, und für die Lüftung vorgesehen. Der Platzbedarf beträgt ca. 340 m². Die Disposition wird als Beilage abgegeben.

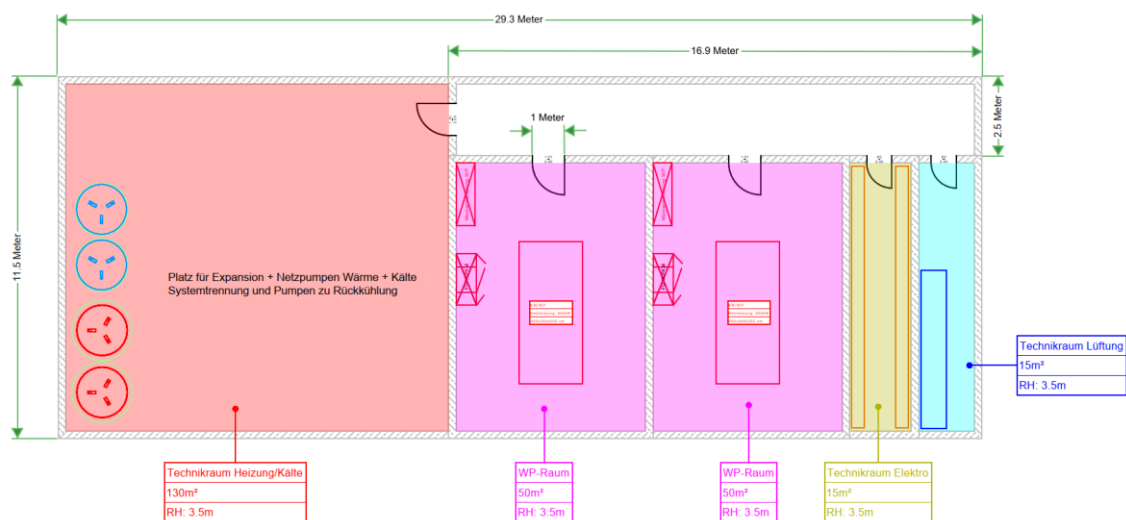


Abbildung 10 Grobdisposition Energiezentrale mit Wärmepumpen 1.3 MW

Die Rückkühler resp. Luft/Wasser-Wärmetauscher für die Regeneration der EWS müssen aussen aufgestellt werden. Die F-Gase-Verordnung gibt vor, welche Kältemittel für die Wärmepumpe verwendet werden können. Aufgrund der Verordnung und des hohen Leistungsbedarfs kommen hauptsächlich drei Kältemittel in Frage:

- **Ammoniak:** Mit einer zweistufigen Wärmepumpe können Temperaturen bis ca. 90° C erreicht werden. Aufgrund der Giftigkeit und Entflammbarkeit des Kältemittels müssen die Wärmepumpen in separaten Räumen erstellt werden, die bei einer Havarie stromlos geschaltet werden können. Es wird eine Havarielüftung benötigt, welche im Normalfall über den höchsten Punkt der umliegenden Gebäude – in diesem Fall der bestehenden Sporthalle – geführt wird. Das ausgearbeitete Layout der Energiezentrale basiert auf Ammoniak.

- **HFO:** Die Auslegung der Maschinenräume und die möglichen Temperaturen mit HFO sind vergleichbar mit Ammoniak. Das Kältemittel ist synthetisch und hat ein ähnlich tiefes Treibhausgaspotenzial wie Ammoniak. Allerdings zeigen verschiedene Studien, dass die Abbauprodukte von HFO sich in der Umwelt anreichern und toxisch für die Umwelt sind. Es ist daher unklar, ob HFO in Zukunft nicht doch stärker reguliert wird.
- **Propan:** Wärmepumpen mit diesem Kältemittel sind aktuell stark in der Entwicklung. Sie sind oft günstiger in der Anschaffung als Ammoniak. Aufgrund der hohen Explosionsgefahr werden die Wärmepumpen oft aussenaufgestellt. Eine unterirdische Aufstellung wäre genauer zu klären und würde voraussichtlich zu einem deutlich höheren Platzbedarf führen. Auch erreichen diese Wärmepumpen nur Vorlauftemperaturen von maximal 68 bis 70°C, abhängig vom Hersteller.

Das Konzept zur Versorgung des Perimeters sieht für beide Varianten wie folgt aus:

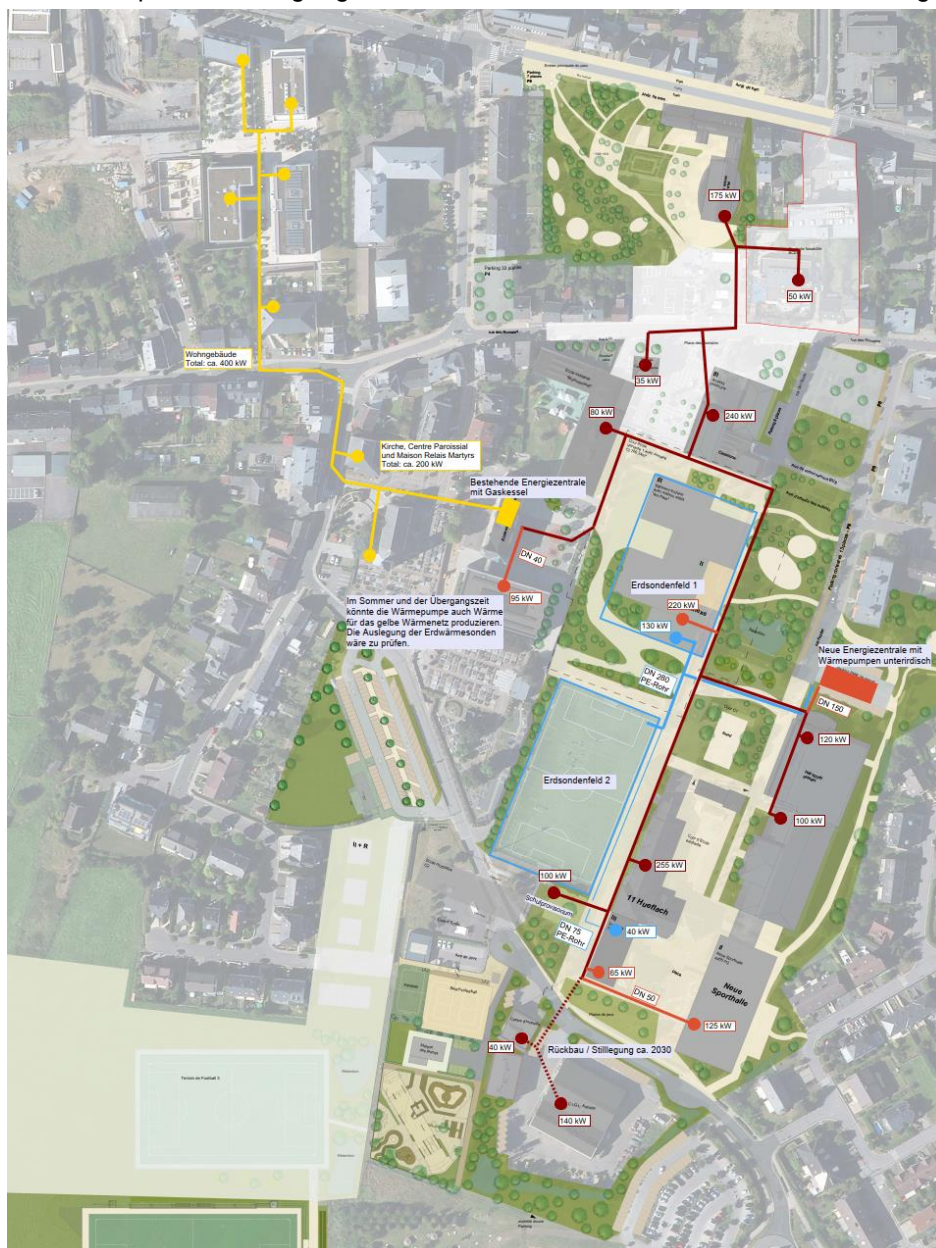


Abbildung 11 Konzept Variante 2 – Zentrale Wärmepumpe mit Erdwärmesonden

Das bestehende Fernwärmenetz wird weiter genutzt. Bei der bestehenden Energiezentrale in der Maison Relais Martyrs/Centre Paroissial wird das Netz getrennt, so dass der in **Abbildung 11** gelb



dargestellt Teil unabhängig vom neuen Erzeugungskonzept weiter über den Gaskessel versorgt werden kann.

Die Untervarianten unterscheiden sich in der Anzahl der Erdwärmesonden und der genutzten Quellen für die Wärmepumpe.

Die Vorteile der Varianten mit Erdwärmesonden sind die höhere Effizienz im Betrieb, verglichen mit den Luft/Wasser-Wärmepumpen. Zudem kann über das Anergienetz passiv mittels Geocooling gekühlt werden. Die Bestandsgebäude können mit vergleichsweise geringen Anpassungen mitversorgt werden. Eine aktive Kühlung wäre über ein zusätzliches Kältenetz möglich, dies wurde aufgrund des tiefen Kältebedarfs nicht geprüft.

Die Nachteile sind die hohen Investitionskosten für die Erstellung der Erdwärmesonden und die benötigte zusätzliche Regeneration.

4.2.1 Variante 2 – EWS mit zentraler Wärmepumpe

Variante 2 entspricht einer klassischen Auslegung der Erdwärmesonden, so dass diese 100% des benötigten Wärmebedarfs abdecken können. Gemäss EWS-Simulation muss eine Rückkühlleistung von ca. 850 kW zur Regeneration installiert werden, damit die Temperaturen in den Erdwärmesonden-Feldern nicht unter -1.5°C fallen (vgl. **Abbildung 12**). Sinken die Temperaturen zu tief, kann die Wärmepumpe die benötigte Leistung nicht mehr bereitstellen und im schlimmsten Fall können die Erdwärmesonden durch Eisbildung beschädigt werden.

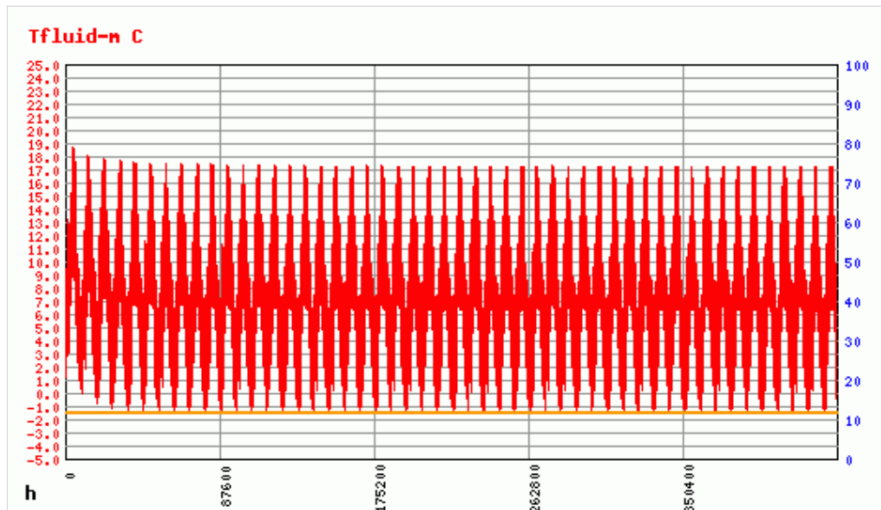


Abbildung 12 Simulation: Mittlere Temperatur in den Erdsonden mit 850 kW Regeneration

Es müssen ca. 1'560 MWh/a Wärme zusätzlich regeneriert werden. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe liegt bei ca. 3.3.

4.2.2 Variante 2.1 – EWS mit zentraler Wärmepumpe – erhöhte Regeneration

Mithilfe der EWS-Simulation wurde geprüft, wie die Anzahl der EWS reduziert werden kann, wenn die Leistung der Rückkühlung erhöht wird. Die Resultate sind in **Tabelle 4** zusammengefasst. Um die Anzahl der Sonden um ca. 30 zu reduzieren, müsste die Rückkühlleistung auf 1.5 MW erhöht werden.

Tabelle 4: Simulationsergebnisse nach 50 Jahren

Anzahl EWS	Max. Entzugsleistung	Wärmeentzug	Leistung Rückkühler	Regeneration Rückkühler	Regeneration Kälte	Anteil Regeneration
410	24.3 W/m	1'870 MWh/a	850 kW	1'560 MWh/a	90 MWh/a	88 %
380	27.2 W/m	1'880 MWh/a	1'500 kW	1'640 MWh/a	90 MWh/a	92 %
355	29.1 W/m	1'890 MWh/a	2'000 kW	1'680 MWh/a	90 MWh/a	94 %



Diese Variante wurde aufgrund der hohen benötigten Rückkühlleistung und dem geringen Reduktionspotenzial der EWS nicht weiterverfolgt.

4.3 VARIANTE 2.2 – EWS MIT ZENTRALER WÄRMEPUMPE OPTIMIERT

Neben der Reduktion der EWS durch die Erhöhung der Rückkühlleistung wurde eine bivalente Lösung mit der Nutzung des Rückkühlers als zusätzliche Quelle für die Wärmepumpe geprüft. Sobald die Aussentemperaturen ca. 3 bis 4°C höher als die Temperaturen in den EWS sind, ist der Betrieb über Aussenluft effizienter. So können die Erdwärmesonden entlastet und im Winter eine höhere Leistung entzogen werden.

Es können 33% der Wärme über Luft als Quelle bereitgestellt werden. Unter der Annahme, dass die maximale Entzugsleistung ab den Erdsonden aus der Simulation von 735 kW mit 35 W/m gedeckt werden können, sind so noch rund 300 Erdsonden notwendig, um den Wärmebedarf zu decken.

Diese Auslegung muss in einem nächsten Schritt anhand eines TRT-Tests verifiziert werden.

4.4 VARIANTE 3 – ZENTRALE HOLZPELLET-FEUERUNG

Analog zur Variante 2 wurde für Variante 3 eine Disposition für die Energiezentrale erstellt:

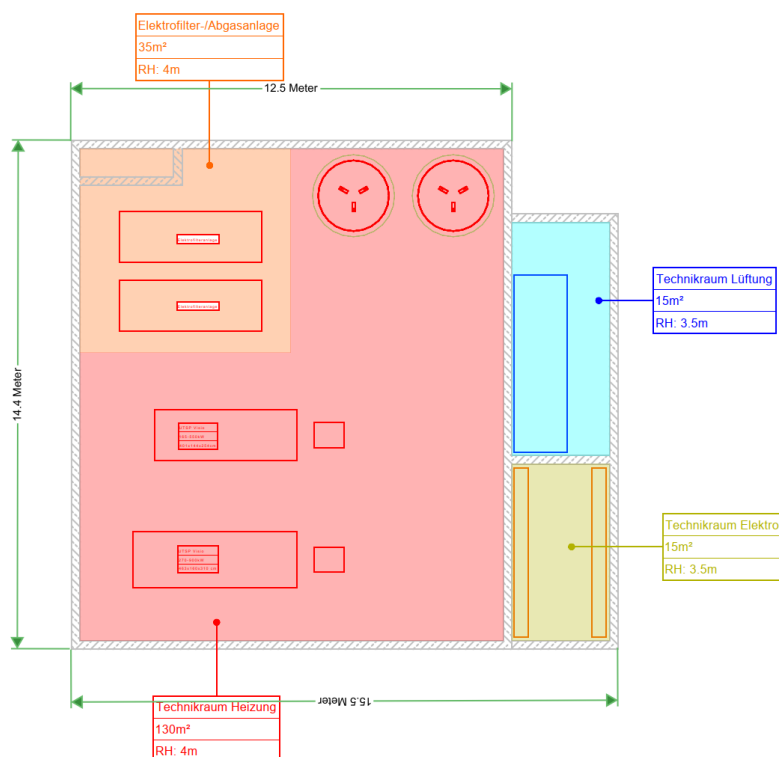


Abbildung 13 Grobdisposition Energiezentrale mit Holzpellet-Feuerung 1.3 MW

Der Platzbedarf in der Energiezentrale beträgt ca. 220 m². Zusätzlich werden zwei unterirdische Holzpellet-Tanks mit einem Nutzvolumen von je 72 m³ resp. total 92 Tonnen installiert. Unter Volllastbetrieb im Winter müssen die Lagertanks ca. alle zehn Tage neu befüllt werden. Je Lagerfüllung sind 3 LKW-Ladungen mit je 25t Holzpellets notwendig. Pro Jahr sind acht bis neun Befüllungen notwendig, was ca. 24 bis 27 LKW-Fahrten pro Jahr entspricht.

In der Zentrale sind zwei Holzpellet-Kessel installiert. Um den Schwachlastbetrieb im Sommer besser abzudecken, wird ein Kessel mit ca. 1/3 der Leistung und ein grösserer Kessel mit 2/3 der totalen Leistung installiert. Für beide Kessel wird ein Elektrofilter und ein Kamin benötigt. Der

Kamin muss über den höchsten Punkt der umliegenden Gebäude führen. Die weiteren Komponenten wie Speicher, Expansion und Pumpen können im gleichen Raum wie die Holzfeuerung installiert werden.

Das Konzept für die Versorgung des Perimeters sieht wie folgt aus:

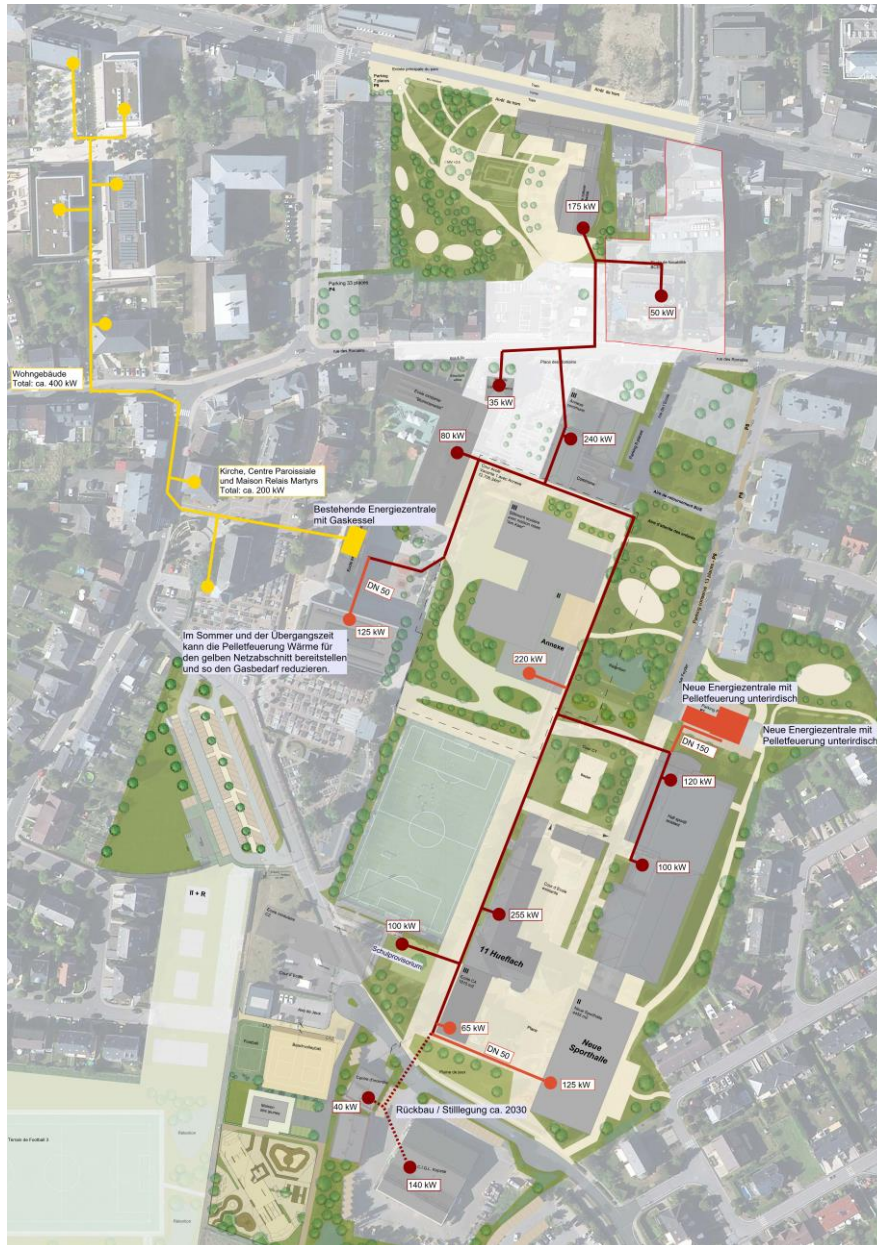


Abbildung 14 Konzept Variante 3 – Zentrale Holzpellet-Feuerung

Die Versorgung mit einer zentralen Holzpellet-Feuerung hat den Vorteil, dass die Temperaturen im Netz ohne Effizienzverluste bei 85° C belassen werden können. Es sind keine Anpassungen in den Bestandsgebäuden notwendig. Auch die Investitionskosten sind tiefer als bei der Erstellung von Erdwärmesonden. Auch könnte das System so erweitert werden, dass auch die Gebäude im Norden des bestehenden Wärmeverbunds (in **Abbildung 14** gelb dargestellt) mitversorgt werden könnten.

Mit dieser Variante ist das Kühlen im Sommer nicht möglich. Für eine Gebäudekühlung müssten zusätzliche Kältemaschinen installiert werden. Die Logistik zur Anlieferung der Holzpellet ist vertieft zu klären, so dass die Zufahrt mit grossen Lastwagen möglich ist.

5 STANDORTE ENERGIEZENTRALE

Für eine neue Energiezentrale wurden verschiedene Standorte bei den Neubauten diskutiert. Eine Integration in die geplanten Gebäude ist aufgrund des Platzbedarfs voraussichtlich nicht möglich.

Es wurde entschieden, die Energiezentrale unterirdisch, unter dem Parkplatz nördlich der bestehenden Turnhalle zu erstellen (vgl. **Abbildung 15**). Dies hat mehrere Vorteile:

Die bestehende Energiezentrale befindet sich in der Sporthalle. Der Einspeisepunkt ins Netz ist somit am gleichen Ort und kann ohne Anpassungen im Fernwärmenetz erfolgen.

Der Parkplatz befindet sich etwas ausserhalb des Hauptareals. So wird der Schulalltag weniger durch die Energieerzeugung gestört. Bei der Erzeugung mit Holzpellet müssen die Lastwagen nicht über die Pausenplätze fahren. Beim Einsatz von Erdsonden wird die Regeneration im Sommer weniger wahrgenommen.



Abbildung 15 Standort Energiezentrale (violett)



6 ÖKOLOGISCHE BETRACHTUNG

6.1 ENDENERGIEZUSAMMENSTELLUNG

Die Endenergiezusammenstellung zeigt auf, wie viel Energie für die Bereitstellung des Wärme- und Kältebedarfs im Perimeter benötigt wird. Berücksichtigt werden dabei auch Verluste in der Erzeugung und im Wärmenetz sowie der benötigte Pumpenstrom.

Tabelle 5 Wirkungsgrade und Effizienz der Heizsysteme

Parameter	Wert
Wirkungsgrad Pelletkessel	0.8
Jahresarbeitszahl (JAZ) Luft/Wasser-Wärmepumpen	2
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe mit EWS	3.3
Strom für Umwälzpumpen (Anteilig an Nutzenergie)	5%
Strom für Regeneration der EWS (Anteilig an benötigter Regeneration)	6.7%
Verluste im Wärmenetz	5%

Der Endenergiebedarf der Variante mit Holzpellet ist mit ca. 3'300 MWh/a deutlich höher als der Endenergiebedarf der Varianten mit Wärmepumpen (vgl. **Abbildung 16**). Zudem muss bei den Varianten mit Wärmepumpen nur der Stromanteil extern eingekauft werden, die Anergie steht gratis zur Verfügung. Der Strombedarf liegt zwischen 960 bis 1'330 MWh/a.

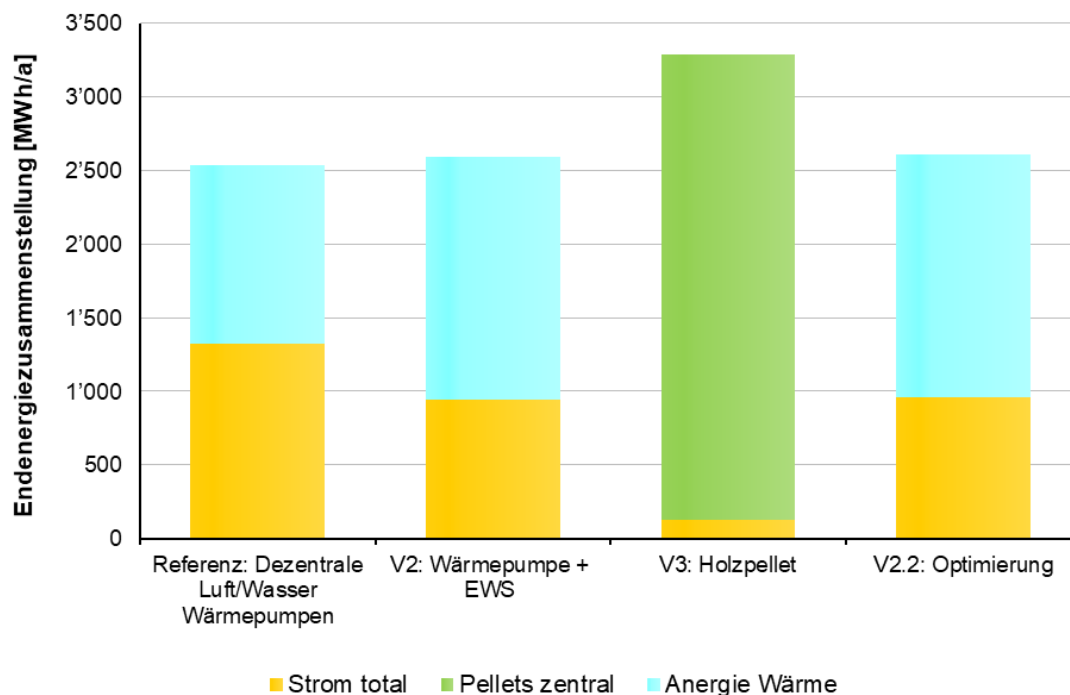


Abbildung 16 Endenergiezusammenstellung der Varianten

6.2 TREIBHAUSGASEMISSIONEN

Die Treibhausgasemissionen wurden gemäss dem Dokument «Règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des bâtiments – Annex II concernant les bâtiments fonctionnels»



Stand 09.06.2021 berechnet. Da dort nur der durchschnittliche Strommix von Luxemburg abgebildet ist, wird mit dem Emissionsfaktor für erneuerbaren Strom gemäss SIA 180 (Schweizer Norm des Schweizer Ingenieur- und Architektenverbands) der Einfluss des gewählten Strommixes aufgezeigt.

Tabelle 6 Treibhausgas-Emissionsfaktoren

Energieträger	Emissionsfaktor
Holzpellet	0.04 kg CO ₂ -eq/kWh
Durchschnittlicher Strommix Luxemburg	0.376 kg CO ₂ -eq/kWh
Erneuerbarer Strommix	0.015 kg CO ₂ -eq/kWh

Abhängig vom verwendeten Strommix sind die Emissionen der Wärmepumpen-Varianten höher oder tiefer als bei der Variante mit Holzpellet (vgl. **Abbildung 17**). Beim Einsatz von Wärmepumpen sollte ein erneuerbarer Strommix verwendet werden, um das Heizsystem mit geringen CO₂-Emissionen zu betreiben.

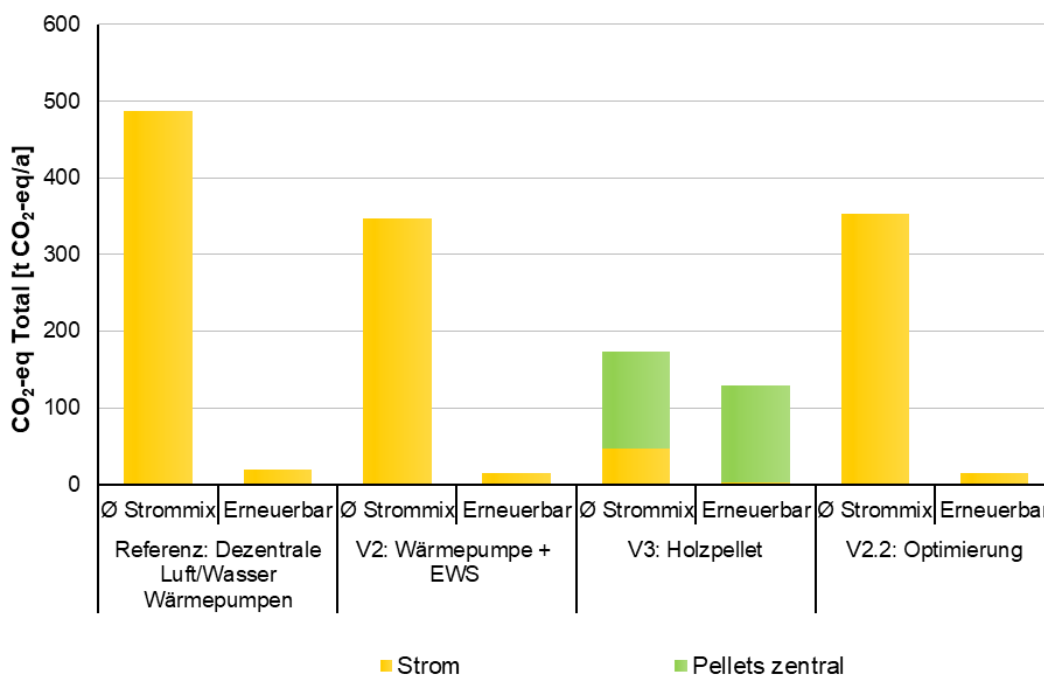


Abbildung 17 Treibhausgasemissionen der Varianten

7 WIRTSCHAFTLICHKEIT

7.1 ABGRENZUNG INVESTITIONSKOSTEN

Die folgende **Abbildung 18** zeigt die Kostenabgrenzung für die Neubauten. Es wurden die Kosten für die Erschliessung der Quellen, den Bau und die technische Ausstattung der Energiezentrale, notwendige Anschlüsse an das bestehende Fernwärmenetz sowie die Übergabestationen eingerechnet. Bei Bestandsgebäuden wurden keine Kosten für die Wärmetauscher eingerechnet, da die bestehenden weiterverwendet werden können. Die Heizverteilung in den Gebäuden ist nicht Teil der Kostenschätzung.

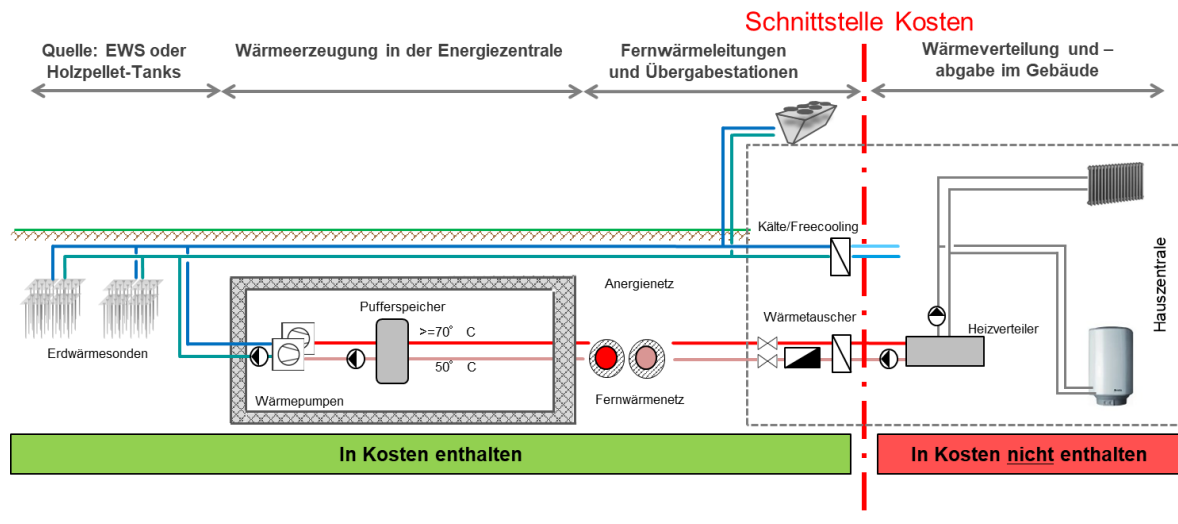


Abbildung 18 Kostenschnittstelle Neubauten

Folgende Kosten sind in der Kostenschätzung nicht enthalten:

- Rückbau oder Instandsetzungen im bestehenden Fernwärmenetz
- Erweiterung oder Neubau von Trafostationen zur Elektroerschliessung der Wärmepumpen⁶
- Umgebungsarbeiten: Es wird angenommen, dass die Tiefbauarbeiten für die Erstellung von EWS und Energienetzen im Zuge der Neubauten anfallen und zu keinen Mehrkosten führen
- Ersatz von bestehenden Wärmetauschern
- Die Investitionskosten für die dezentralen Luft/Wasser-Wärmepumpen stammen aus vergleichbaren Projekten, die Machbarkeit in den Bestandsgebäuden wurde nicht vertieft abgeklärt.

⁶ Dies muss im Gesamtkonzept zur Elektroerschliessung des Areals mitberücksichtigt werden.



7.2 PARAMETER WIRTSCHAFTLICHKEITSRECHNUNG

Folgende Parameter wurden für die Berechnung der Investitions- und Energiegestehungskosten verwendet:

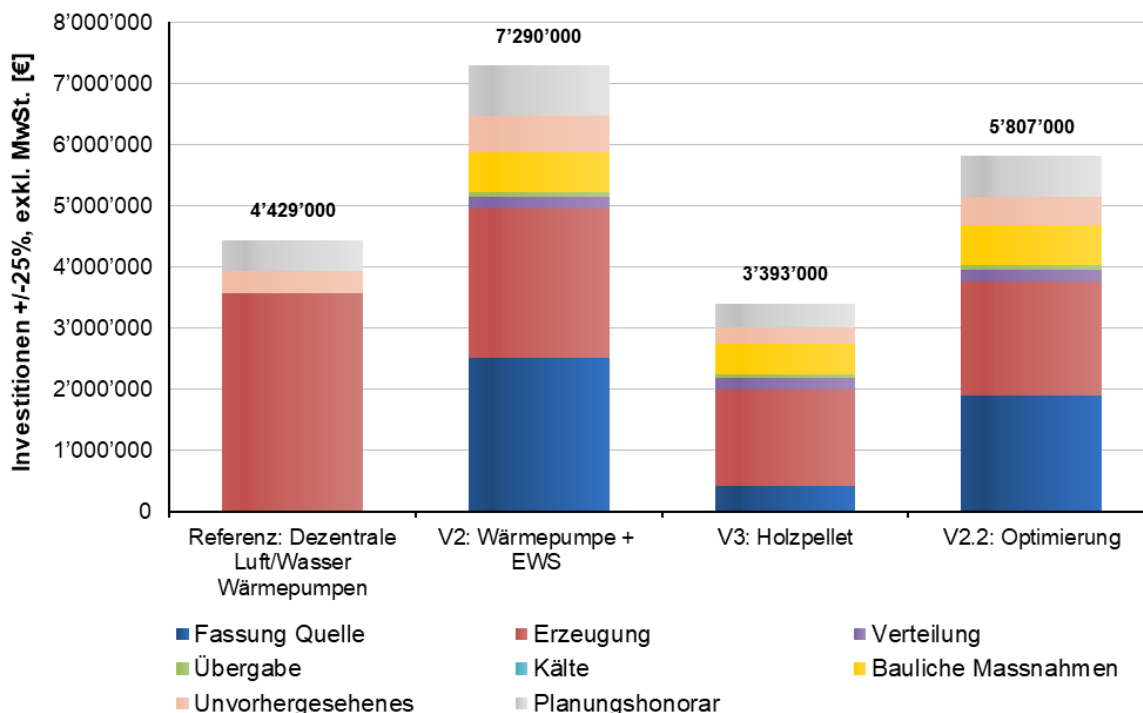
Tabelle 7 Parameter Wirtschaftlichkeitsrechnung

Parameter	Wert	Kommentar
Kalkulationszinssatz	3%	Sensitivität wird aufgezeigt
Teuerung	2%	
Energiepreissteigerung	2%	Sensitivität wird aufgezeigt
Unvorhergesehenes	10%	
Amortisationszeit		
Erzeugungsanlagen	25 Jahre	
Bauwerke	50 Jahre	
Fernwärmenetz	50 Jahre	
Energiepreis		
Holzpellet	6.6 Cent/kWh	Ø letztes Jahr Deutschland ⁷
Strom Energiepreis	21 Cent/kWh	Aktuell gedeckelt
Betriebs- und Unterhaltskosten		
Erzeugung über Biomasse	5%	
Erzeugung über Wärmepumpen	2%	
Lagerung, Fernleitung, Baulich	0.5%	

7.3 INVESTITIONSKOSTEN

Die Investitionskosten der Varianten liegen zwischen 3.4 bis 7.3 Mio. Euro (vgl. **Abbildung 19**; Kostengenauigkeit $\pm 25\%$). Die tiefsten Investitionskosten weist dabei die Holzpellet-Variante auf. Die klassische EWS-Variante ist mit 7.3 Mio. Euro deutlich teurer. Kostentreiber sind neben den hohen Kosten für die Erstellung der EWS auch die Wärmepumpen. Wärmepumpen mit Ammoniak im benötigten Leistungsbereich sind aktuell sehr teuer. Deswegen wurde in der optimierten Variante 2.2 auf eine günstigere HFO-Wärmepumpe gewechselt. Trotzdem ist diese Variante mit 5.8 Mio. Euro deutlich teurer als die Holzpellet-Variante. Die Variante mit dezentralen Luft/Wasser-Wärmepumpen ist günstiger als die Varianten mit Erdwärmesonden.

⁷ Quelle: holzpellets.net/holzpellet-charts

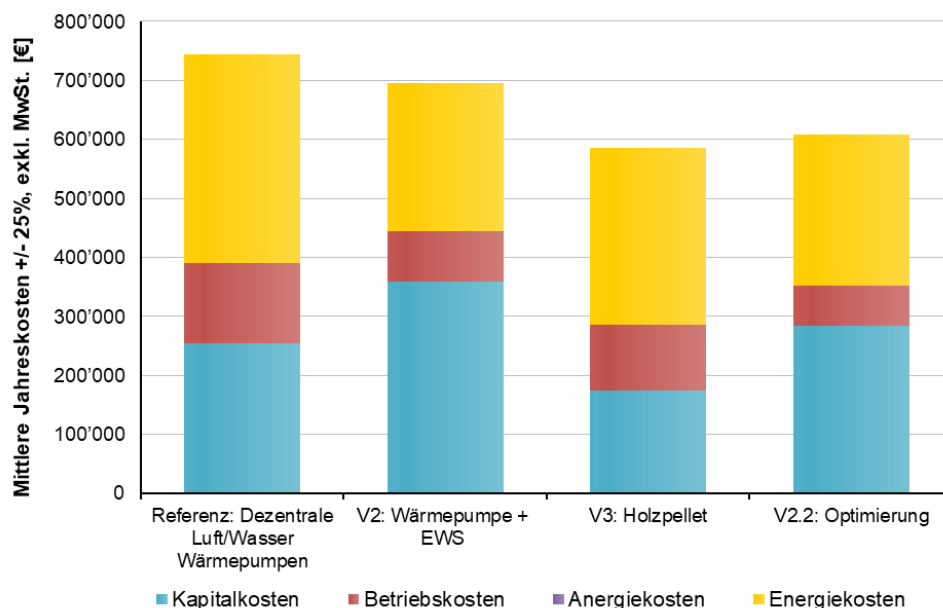
Abbildung 19 Investitionskosten \pm 25%

7.4 MITTLERE JAHRESKOSTEN UND ENERGIEGESTEHUNGSKOSTEN

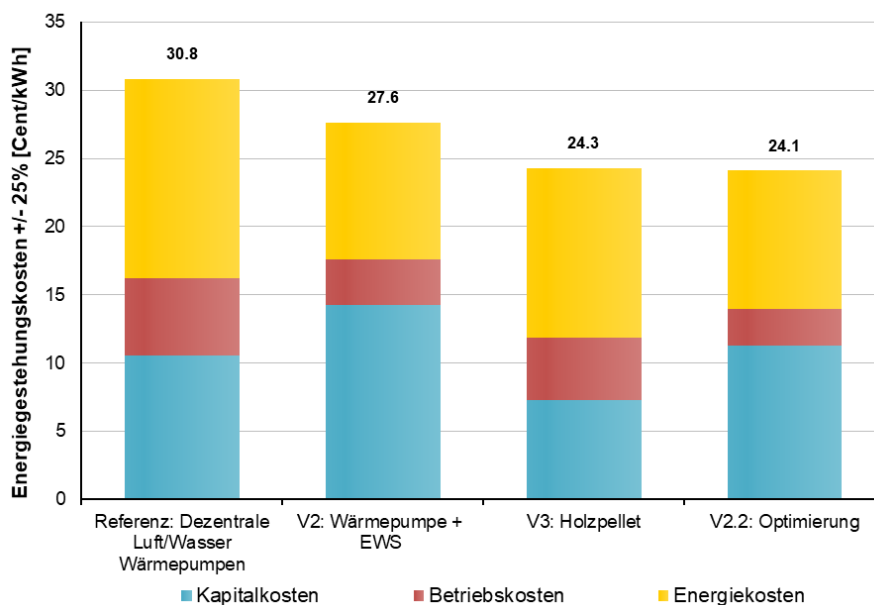
Um die Kosten der Varianten über die gesamte Lebensdauer der Anlage bewerten zu können, wurden die mittleren Jahreskosten und die Energiegestehungskosten mittels der Annuitätenmethode berechnet. Dabei fliessen folgende Werte mit ein:

- **Kapitalkosten:** Die Investitionskosten werden mittels Annuitätenmethode und der definierten Lebensdauer der verschiedenen Komponenten in mittlere Jahreskosten umgerechnet.
- **Betriebskosten:** Darin enthalten sind Personal- und Wartungskosten, welche für den Betrieb und Unterhalt der Anlage anfallen (Mittelwert unter Berücksichtigung der Teuerung).
- **Energiekosten:** Kosten für den Kauf von Strom und Holzpellets (Mittelwert unter Berücksichtigung der Teuerung)

Die mittleren Jahreskosten liegen zwischen 585'000 bis 745'000 Euro pro Jahr (vgl. **Abbildung 20**; Kostengenauigkeit \pm 25%). Die Referenzvariante ist aufgrund der hohen Kosten für Energie und Wartung insgesamt die teuerste Variante. Auch Variante 2 ist deutlich teurer. Die Varianten 2.2 und 3 weisen vergleichbare mittlere Jahreskosten auf. Bei der Holzpellet-Variante fallen vor allem die Energiekosten ins Gewicht.


Abbildung 20 Mittlere Jahreskosten $\pm 25\%$

Die Energiegestehungskosten zeigen ein ähnliches Bild wie die mittleren Jahreskosten. Sie liegen zwischen 24.1 bis 30.8 Cent/kWh (vgl. **Abbildung 21**; Kostengenauigkeit $\pm 25\%$). Da in der Variante mit Wärmepumpen auch Kälte bereitgestellt wird, verbessert sich die Bewertung im Vergleich zur Holzpellet-Variante. Die Varianten 2.2 und 3 liegen weiterhin sehr nahe beieinander.


Abbildung 21 Energiegestehungskosten $\pm 25\%$

Die Sensitivität des Kapitalzinssatzes wird in der folgenden Grafik aufgezeigt. Wird dieser von 3% auf 5% erhöht, so steigen die Energiegestehungskosten um 2 bis 4 Cent/kWh. Die Varianten mit höheren Kapitalkosten reagieren stärker auf die Erhöhung des Kapitalzinssatzes.

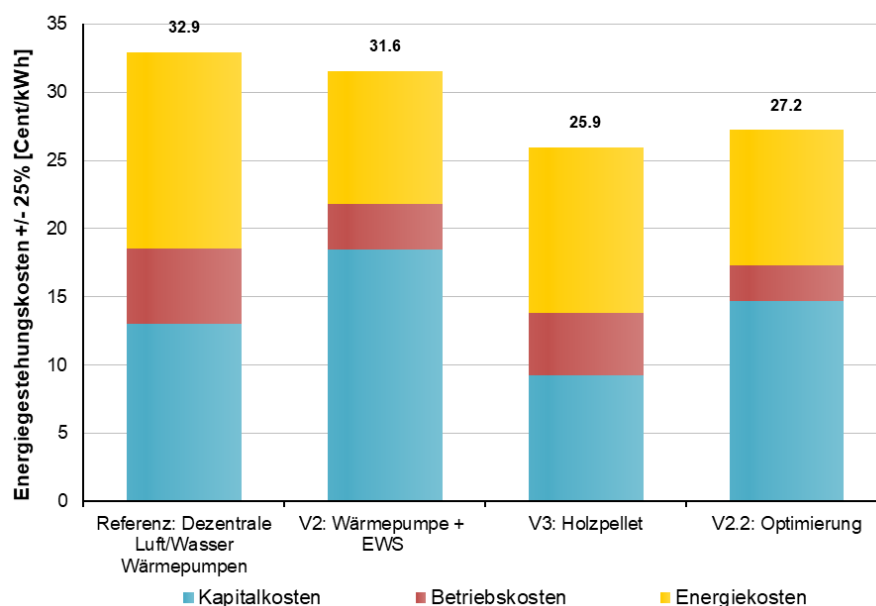


Abbildung 22 Energiegestehungskosten \pm 25% mit 5% Kapitalzinssatz

7.5 FÖRDERMÖGLICHKEITEN

Die Förderbeiträge für Wärmepumpen- und Holzpellet-Anlagen in dieser Grössenordnung werden individuell bestimmt. Ausserdem sind in den nächsten Jahren Anpassungen zu erwarten. Bis zu einer Leistung von 150 kW sind Förderbeiträge von bis zu 40% der Investitionskosten möglich. Voraussichtlich werden bei den Varianten mit Erdsonden zusätzlich zur Förderung der Wärmepumpe auch Fördergelder für die Bohrung der Sonden gesprochen. Dies muss mit einem konkreten Projektvorschlag abgeholt werden.

Um den Einfluss der Fördergelder aufzuzeigen, wurden die Investitionskosten bei allen Varianten um 20% reduziert. Dies entspricht einer Förderung in der Höhe von 0.7 bis 1.5 Mio. Euro. Die Energiegestehungskosten der teuren EWS-Varianten sinken dadurch deutlich:

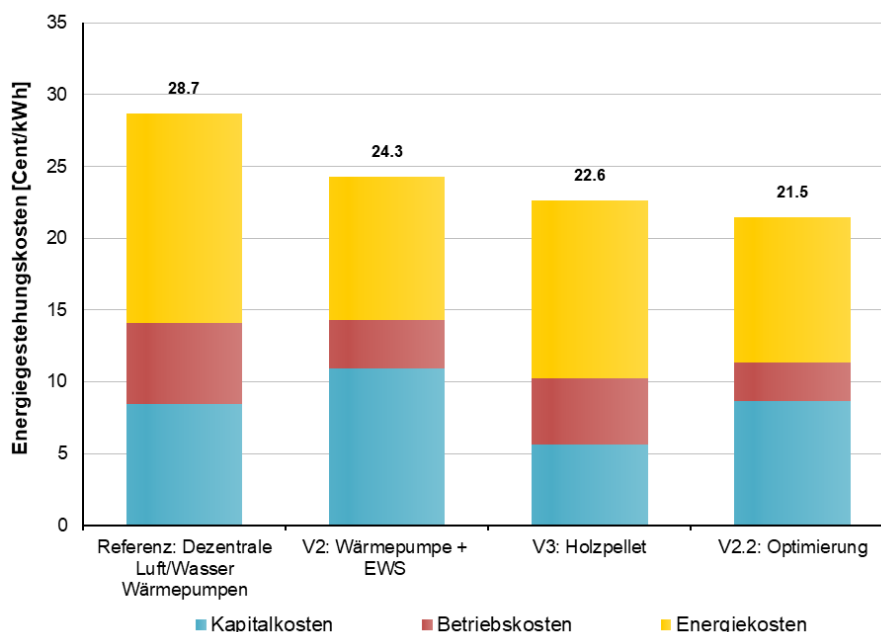


Abbildung 23 Energiegestehungskosten \pm 25% mit Förderbeiträgen



7.6 SENSITIVITÄT ENERGIEKOSTEN

Die zukünftige Energiepreisentwicklung ist schwer abzuschätzen. Vermutlich werden die Strompreise mit der Aufhebung der Deckelung steigen. Die Holzpellet-Preise sind abhängig vom globalen Energiemarkt und dadurch starken Schwankungen unterworfen. In der untenstehenden Grafik wird aufgezeigt in welcher Preiskonstellation welche Variante die tieferen Energiegestehungskosten aufweist (exkl. Förderbeiträge):

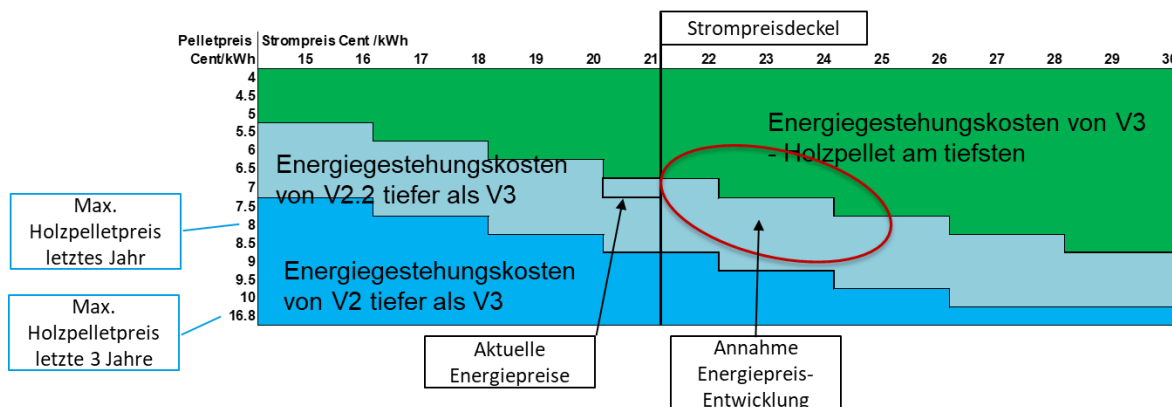


Abbildung 24 Sensitivität Energiegestehungskosten

Die Sensitivität der Holzpellet-Variante auf eine Steigerung der Energiepreise ist höher als für die Wärmepumpen-Varianten.



8 ZUSAMMENFASSUNG

8.1 FAZIT UND EMPFEHLUNG

Die Varianten wurden anhand von verschiedenen Kriterien bewertet:

Tabelle 8 Zusammenfassung der Varianten

	V1 – LW/WP	V2 – WP +EWS	V3 – Holzpellet	V2.2 – EWS optimiert
Investitionskosten	+	--	++	-
Energiegestehungskosten	--	-	++	++
Sensitivität Energiepreise	-	++	--	++
Technische Vorteile	+ Aktive Kälte- erzeugung möglich	+ Aktive Kälte- erzeugung möglich + Freecooling möglich + Effiziente, bedarfsgerechte Wärmeerzeugung	+ Hohe Temperaturen im Netz möglich	+ Aktive Kälteerzeugung möglich + Freecooling möglich + Effiziente, bedarfsgerechte Wärmeerzeugung
Technische Nachteile	- Lärm der Wärmepumpen - Technische Mach-barkeit im Bestand - Tiefe Effizienz im Winter	- Zusätzliche Wärme für Regeneration der EWS notwendig	- Logistik für Lieferung Holzpellet auf Schulgelände	- Komplexeres System

Aufgrund der verschiedenen Vor- und Nachteile wird Variante 2.2 mit einer zentralen Wärmepumpe und Erdwärmesonden empfohlen.

Die Variante überzeugt mit tiefen Energiegestehungskosten und einer tiefen Sensitivität auf steigende Energiepreise. Zudem kann der zukünftig voraussichtlich zunehmende Kältebedarf gedeckt werden.

Nachteilig sind die hohen Investitionskosten, welche durch die Fördermittel voraussichtlich teilweise abgefangen werden können.

Die Steuerung des Systems, so dass jeweils die effizientere Quelle genutzt wird und eine ausreichende Regeneration sichergestellt wird, ist komplexer als bei den anderen Varianten aber machbar.

Die Nutzung von Biomasse wird nicht empfohlen, da diese begrenzt ist und zur Erreichung der Dekarbonisierung des Energiesystems besser für Hochtemperaturanwendungen genutzt wird, bei denen der Einsatz von Wärmepumpen nicht möglich ist.

Die Variante mit Holzpellet sollte jedoch als Back-Up weiter in Betracht gezogen werden, falls der TRT-Test nicht die erhofften Resultate liefert.



8.2 WEITERES VORGEHEN

Die Variante mit Erdwärmesonden und Wärmepumpen muss in den nächsten Schritten vertieft werden.

Folgende Punkte sind zu klären:

- **Wärmepumpenkonzept:** Die Wahl des Kältemittels hat grosse Auswirkungen auf die Investitionskosten und die Auslegung der Energiezentrale. Um das Konzept zu finalisieren, benötigt es daher eine Entscheidung.
- **Reduktion des Flächenbedarfs in der unterirdischen Zentrale:** Durch die Integration von Komponenten in der bestehenden Energiezentrale oder die Weiternutzung von bestehenden Komponenten (z.B. Transferpumpen) können die Investitionskosten für die Zentrale reduziert werden.
- **Reduktion Rückkühler-Leistung:** Der Kältebedarf der Gebäude sollte vertieft abgeschätzt werden. Möglicherweise können auch Bestandsgebäude im Sommer über das Energienetz gekühlt werden, so dass die zu installierende Leistung für die Regeneration reduziert werden kann. Auch kann evtl. die Abwärme aus den Kühlräumen der Kantinenküche genutzt werden.
- **Probebohrung mit TRT:** Mit einem TRT kann die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes genauer bestimmt werden. Die aktuell genutzten Werte sind eher tief; es besteht die Möglichkeit, dass die Anzahl der benötigten Sonden reduziert werden kann.
- **Abklärung Fördermittel:** Die möglichen Fördermittel für die Erzeugungsvarianten sind mit den Behörden genauer abzuklären.
- **Abgleich Energie- und Leistungsbedarf der Neubauten:** Für die folgenden Neubauten lagen gegen Ende der Machbarkeitsstudie neue Zahlen zum Leistungsbedarf aus den separat laufenden Planungen vor:
 - Sporthalle Neubau: 125 kW (+43 kW)
 - Kindertagesstätte Am Kaer: 220 kW⁸ (+15 kW)

Aufgrund der tiefen benötigten Vorlauftemperaturen soll auch die Schule Ben Heyart über das neue Versorgungskonzept versorgt werden. In den Investitionskosten ist der Anschluss enthalten. Der Energie- und Leistungsbedarf wurde noch nicht angepasst.

Gleichzeitig wurde der Leistungsbedarf der Schule Hueflach in der Machbarkeitsstudie leicht überschätzt, da ein Teil der Gebäude für den Neubau C4 abgerissen wird. Dies ist in den Abschätzungen nicht enthalten, da die Berechnungen und Simulationen zu diesem Zeitpunkt bereits erstellt waren. Kleine Anpassungen im Leistungsbedarf sind für alle Konzepte möglich. Ein deutlich höherer Leistungsbedarf kann aufgrund der begrenzten EWS-Kapazität jedoch nicht gedeckt werden.

⁸ Gemäss Machbarkeitsstudie liegt der Leistungsbedarf bei 270 kW. Aufgrund der hohen Kosten für den Neubau muss das Projekt aber redimensioniert und das Raumbuch überdacht werden. Der tatsächliche Leistungsbedarf dürfte daher tiefer ausfallen als in der Machbarkeitsstudie.



9 ANHANG

9.1 VERZEICHNISSE

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Projektperimeter (Grundplan: Masterplan Strassen 2030)	6
Abbildung 2 Entwicklung Wärmebedarf des Verbundes	10
Abbildung 3 Wärmeenergiebedarf der Gebäude [MWh/a]	11
Abbildung 4 Entwicklung Energiebedarf im Perimeter	12
Abbildung 5 Entwicklung Leistungsbedarf im Perimeter	12
Abbildung 6 Temperatur- und Leistungsbedarf der Gebäude	13
Abbildung 7 Beschränkungen Erdwärmesonden-Bohrungen (map.geoportail.lu, Juni 2021)	14
Abbildung 8 Konzept Variante 1.1 – Dezentrale Luft/Wasser-Wärmepumpen	16
Abbildung 9 EWS-Potenzial im Perimeter	17
Abbildung 10 Grobdisposition Energiezentrale mit Wärmepumpen 1.3 MW	18
Abbildung 11 Konzept Variante 2 – Zentrale Wärmepumpe mit Erdwärmesonden	19
Abbildung 12 Simulation: Mittlere Temperatur in den Erdsonden mit 850 kW Regeneration	20
Abbildung 13 Grobdisposition Energiezentrale mit Holzpellet-Feuerung 1.3 MW	21
Abbildung 14 Konzept Variante 3 – Zentrale Holzpellet-Feuerung	22
Abbildung 15 Standort Energiezentrale (violett)	23
Abbildung 16 Endenergiezusammenstellung der Varianten	24
Abbildung 17 Treibhausgasemissionen der Varianten	25
Abbildung 18 Kostenschnittstelle Neubauten	26
Abbildung 19 Investitionskosten $\pm 25\%$	28
Abbildung 20 Mittlere Jahreskosten $\pm 25\%$	29
Abbildung 21 Energiegestehungskosten $\pm 25\%$	29
Abbildung 22 Energiegestehungskosten $\pm 25\%$ mit 5% Kapitalzinssatz	30
Abbildung 23 Energiegestehungskosten $\pm 25\%$ mit Förderbeiträgen	30
Abbildung 24 Sensitivität Energiegestehungskosten	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Gebäude im Projektperimeter	7
Tabelle 2 Schnittstellen zu laufenden Projekten	8
Tabelle 3 Gebäudedaten Bestand	9
Tabelle 4: Simulationsresultate nach 50 Jahren	20
Tabelle 5 Wirkungsgrade und Effizienz der Heizsysteme	24
Tabelle 6 Treibhausgas-Emissionsfaktoren	25
Tabelle 7 Parameter Wirtschaftlichkeitsrechnung	27
Tabelle 8 Zusammenfassung der Varianten	32
Tabelle 9 Annahmen Zu- und Abgangsdaten Gebäude, Nettogeschossflächen	35
Tabelle 10 Energie- und Leistungsdaten der Gebäude	36



Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
AGE	Administration de la Gestion de l'Eau
EWS	Erdwärmesonden
GZF	Gleichzeitigkeitsfaktor
JAZ	Jahresarbeitszahl
MBS	Machbarkeitsstudie
PV	Photovoltaik
TRT	Thermal Response Test

9.2 ENERGIE- UND LEISTUNGSBEDARF DER GEBÄUDE

Folgende Flächen und Jahreszahlen für Zugang resp. Abbruch wurden für die Gebäude hinterlegt:

Tabelle 9 Annahmen Zu- und Abgangsdaten Gebäude, Nettogeschossflächen

Gebäudebezeichnung	Cluster	Bauvorhaben Bezeichnung	Etappe / Kommentar	Objektstrategie	Zugangsdat- um	Abgangsdat- um	Ausserbetriebnah- me für Sanierung	Inbetriebnah- me nach Sanierung	NGF
									A_{NGF} m ²
Centre Culturel Paul Barbié	Blau	Im Perimeter	Erhalt		1999		2100	2100	1'917
Gemeindehaus	Blau	Im Perimeter	Erhalt		1973		2028	2028	3'583
Hueflach (KiGa+Schule)	Rot	Im Perimeter	Erhalt		1992		2100	2100	3'550
Sportheile - Ancient	Rot	Im Perimeter	Erhalt		1983		2100	2100	1'593
Sportheile - Nouveau	Rot	Im Perimeter	Erhalt		2007		2100	2100	1'954
Krippe Wibbeldeuapp	Blau	Im Perimeter	Erhalt		1999		2100	2100	650
Ateliers + Centre d Intervention	Rot	Im Perimeter	Abbruch		1990	2030			967
Ecole Fondamentale / C4	Rot	Im Perimeter	Neubau		2030				1'543
Sportheile - Neubau	Rot	Im Perimeter	Neubau		2028				2'800
Kindertagesstätte Am Kaer	Rot	Im Perimeter	Neubau		2028				3'391
Mensa Kindertagesstätte	Rot	Im Perimeter	Neubau		2028				817
Ben Heyart, M. Relais Martyrs, Eglise, Centre Paroissial	Blau	Ausserhalb	Erhalt		1900		2100	2100	1'000
Schulprovisorium	Rot	Im Perimeter	Abbruch		2000	2100			500
Jugendtreff	Rot	Einzellösung	Neubau		2027				230
Maison Relais 57	Blau	Im Perimeter	Erhalt		1900		2035	2035	446
Ecole Blumenwiss	Blau	Im Perimeter	Erhalt		2006		2100	2100	1'955
Soziales Wohnen	Gelb	Ausserhalb	Erhalt		1900		2100	2100	1'000



Die folgenden Energie- und Leistungsdaten wurden hinterlegt:

Tabelle 10 Energie- und Leistungsdaten der Gebäude

Gebäudebezeichnung	Wärmebedarf						Kältebedarf			Strombedarf		
	Nutzenergie Raumwärme	Leistung Raumwärme	Nutzenergie Warmwasser	Leistung Warmwasser	Nutzenergie Gesamt	Leistung Gesamt	Nutzenergie Klimakälte	Leistung Klimakälte	Energiebedarf Strom	Leistungsbeford Strom		
	MWh	kW	MWh	kW	MWh	kW	MWh	kW	MWh	kW		
Centre Culturel Paul Babel	343	173	9	3	352	176	0	0	111	43		
Gemeindehaus inkl. Erweiterung	420	211	7	3	427	214	0	0	221	106		
Krippe Wübbelwapp	97	49	2	1	99	50	0	0	18	11		
Huellaeh (Kiga+Schule)	496	249	11	5	507	254	0	0	97	61		
Sporthalle - Ancient	180	96	59	24	239	120	0	0	33	16		
Sporthalle - Nouveau	132	73	72	29	204	102	0	0	48	23		
Ateliers + Centre d Intervention	305	159	63	25	368	184	0	0	106	46		
Ecole Fondamentale / C4	25	60	5	2	30	62	17	39	41	26		
Sporthalle - Neubau	22	44	59	24	82	68	0	0	39	19		
Kindertagesstätte Am Kaer	67	179	64	26	131	205	71	164	174	112		
Ecole Blumenwiss	116	58	6	3	122	61	0	0	0	0		
Schulprossium	194	97	0	0	194	97	0	0	0	0		
Jugendtreff	3	9	1	0	4	9	4	6	10	4		
Ben Heyari, M. Relais Martyrs, Eglise, Centre Paroissial	543	302	0	0	543	302	0	0	0	0		
Maison Relais 57	67	33	1	1	68	34	0	0	0	0		
Soziales Wohnen	550	244	137	81	687	325	0	0	19	11		
Summe	2396	1447	359	144	2754	1591	88	203	888	463		



10 BEILAGEN

10.1 ALLGEMEIN

A	Name	Verfasser	Stand
A1	Konzept Luft/Wasser-Wärmepumpen	A+W	22.05.2024
A2	Konzept Wärmepumpe mit Erdwärmesonden	A+W	22.05.2024
A3	Konzept Holzpellet-Feuerung	A+W	22.05.2024
A4	Bericht EWS-Simulation	A+W	07.06.2024
A5	Zusammenstellung Investitionskosten	A+W	26.06.2024

10.2 HLK

A	Name	Verfasser	Stand
H1	Disposition Energiezentrale mit Wärmepumpen	A+W	15.01.2024
H2	Disposition Energiezentrale mit Holzpellet	A+W	15.01.2024