

Schlussbericht, 20. September 2019

«**Thermische Netze**»

Entscheidungskriterien für die Systemwahl Phase 2



energie schweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Sven Trecco, eicher+pauli Zürich AG, Projektleitung

Ricardo Da Silva, eicher+pauli Zürich AG

Stefan Gemperle, eicher+pauli Zürich AG

**Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

Adresse

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Postadresse: 3003 Bern
Infoline 0848 444 444. www.energieschweiz.ch/beratung
energieschweiz@bfe.admin.ch, www.energieschweiz.ch

Inhalt

1	Symbole und Abkürzungen.....	4
2	Zusammenfassung / Résumé.....	5
3	Ausgangslage.....	8
3.1	Ziel des Arbeitspakets	8
3.2	Vorgehensweise.....	9
3.3	Fragestellungen.....	9
3.4	Abgrenzungen	9
4	Zukünftige Kälteversorgung.....	10
5	Grundlagen.....	12
6	Schnittstellen Betrachtung	12
7	Projektbeschreibung.....	13
7.1	Wärmequelle	13
7.2	Gebäudenutzungen	13
7.3	Perimeter.....	13
7.4	Energie- und Leistungsbedarf.....	14
7.5	Wärmeerzeugung Trinkwarmwasser.....	16
7.6	Lineare Wärmedichte.....	16
7.7	Temperaturen Bedarf.....	17
7.8	Gleichzeitigkeit	17
7.9	Fossile Spitzendeckung.....	18
7.10	Dimensionierung Anlagenelemente	18
7.11	Verteilverluste.....	18
7.12	Wärmerückgewinnung.....	18
7.13	Redundanz.....	18
7.14	JAZ (WP-Esti) für Raumwärme.....	19
7.15	Anlagenkonzepte (Varianten)	19
8	Wirtschaftlichkeit & Ökologie	33
8.1	Grundlagen der Wirtschaftlichkeits- und Ökologieberechnung	33
8.2	Investitionen \pm 25 %	33
8.3	Nutzungsdauer	35
8.4	Wartungs- und Instandsetzungskosten	35
8.5	Jahreskosten.....	35
8.6	Gestehungspreise	37
8.7	Ökologie.....	38
9	Fazit.....	39
10	Ausblick	41
11	Anhang	42

1 Symbole und Abkürzungen

TWW	Trinkwarmwasser
RW	Raumwärme
KK	Klimakälte
PK	Prozesskälte
VLS	Volllaststunden
Trm	Trasse Meter (Vor- und Rücklauf)
K	Kelvin
GW	Grundwasser
JAZ	Jahresarbeitszahl
GIS	Geografisches Informationssystem
WP	Wärmepumpe
NH3	Ammoniak
HFO	Hydrofluoridolefine
PWT	Plattenwärmetauscher

2 Zusammenfassung

In diesem Arbeitspaket soll eine Antwort zu folgender Fragestellung gefunden werden: Welches Verteilsystem und Aufbereitungssystem (zentral, zentral und dezentral, nur dezentral, Netztemperatur, Anzahl Leiter) ist für thermische Netze in Abhängigkeit von der Bedarfsstruktur wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaft?

Untersucht wird ein Perimeter mit annähernd realem Netzaufbau. Als Wärmequelle dient Grundwasser. Der Perimeter umfasst 8 Liegenschaften mit der Nutzung, Verwaltung und dem Baustandard nach MukEN 2014. Der Energie- und Leistungsbedarf für Wärme und Kälte wurde über die SIA 2024 bestimmt, wobei bei der Berechnung die Diskrepanz zwischen Wärme- und Wärmeleistungsbedarf mit Vergleichsprojekten kompensiert wird.

Das Trinkwarmwasser wird aufgrund des geringen Bedarfs, dezentral direkt elektrisch erzeugt. Fossile Wärmeerzeuger sind aufgrund der tiefen Vorlauftemperaturen nicht in der Studie berücksichtigt. Für Zentrale Wärmeerzeuger sind NH3 Wärmepumpen gewählt, für dezentrale Wärmepumpen kommen HFO-Wärmepumpen zum Einsatz.

Mit diesen Vorgaben konnten drei sinnvolle Varianten konzipiert und dimensioniert werden:

Varianten		4-Leiter	2-Leiter	Anergie
Raumwärme	zentral	X	X	
	dezentral			X
Warmwasser	zentral			
	dezentral	X	X	X
Klimakälte	zentral	X	X	X
	dezentral			
Prozesskälte	zentral	X	X	X
	dezentral		X	
Fluidströmung	gerichtet	X	X	
	ungerichtet			X
Energiefluss	unidirektional	X	X	
	bidirektional			X
Unterstationen	direkt			X
	indirekt	X	X	
Anzahl Leiter	2 – Leiter		X	X
	4 – Leiter	X		

Darauf basierend sind die Investitionen $\pm 25\%$ geschätzt und der Endenergiebedarf der Varianten berechnet. Die Wirtschaftlichkeit ist mittels Jahreskosten beurteilt und die Ökologie aufgrund von Primärenergie und CO₂ Äquivalenz verglichen.

Die Analyse zeigt, dass im Vergleich der Jahreskosten die 2-Leiter (Change-Over) Variante die günstigste aber unflexibelste Variante ist. Fast gleichauf (+2%) liegt die 4-Leiter Variante mit klassisch gerichteter Verteilung. Die Anergie Variante liegt auf dem letzten Platz (+11%).

Die Ökologie ist proportional zum Energieverbrauch. Daher gewinnt in dem Punkt in der CO₂- sowie Primärenergiebetrachtung die 4-Leiter Variante.

Die Gestehungspreise (Wärme- und Kälte) aller Varianten liegen trotz voller Deckung der Leistung mit Wärmepumpen zwischen 16.3 - 19.2 Rp./kWh. Diese Zahlen liegen in einem Bereich der Wirtschaftlichkeit, was hauptsächlich auf den Verkauf der Kälte zurückzuführen ist.

Résumé

L'objectif de ce lot de travail est de trouver une réponse à la question suivante: quel système de distribution et d'approvisionnement (centralisé, centralisé et décentralisé, uniquement décentralisé, température du réseau, nombre de tubes) est économiquement et écologiquement plus avantageux pour les réseaux thermiques en fonction du profil du besoin ?

Un quartier avec des conditions proches de la réalité en ce qui concerne le réseau thermique a été choisi comme étude de cas. Une nappe phréatique a été choisie comme source de chaleur. Le quartier comprend 8 édifices administratifs construits selon un standard qui répondent aux exigences du MoPEC 2014. Les besoins en énergie et en puissance pour le chauffage et le refroidissement ont été évalués selon la norme SIA 2024. La différence recensée entre le besoin en chaleur et le besoin en puissance par rapport à la norme a été ajustée grâce à des valeurs comparatives obtenues par des projets réalisés.

En raison de son faible besoin thermique, l'eau chaude sanitaire (ECS) est directement générée par une résistance électrique de manière décentralisée. Les appoints par sources fossiles n'ont pas été considérés dans l'étude en raison des basses températures requises. Pour le chauffage centralisé, des pompes à chaleur à l'ammoniac (NH₃) ont été sélectionnées. En revanche pour le chauffage décentralisé, des pompes à chaleur HFO (hydro-fluoro-oléfiniques) ont été utilisées.

En fonction de ces modalités, trois variantes robustes ont pu être conçues.

Variantes		4-tubes	2-tubes	anergie
Chauffage	centralisé	X	X	
	décentralisé			X
ECS	centralisé			
	décentralisé	X	X	X
Froid de confort	centralisé	X	X	X
	décentralisé			
Froid de processus	centralisé	X	X	X
	décentralisé		X	
Flux de fluide	dirigé	X	X	
	non dirigé			X
Flux d'énergie	unidirectionnel	X	X	
	bidirectionnel			X
Sous-stations	direct			X
	indirect	X	X	
Nombre de tubes	2-tubes		X	X
	4-tubes	X		

Sur cette base, les investissements ont été estimés avec une incertitude de $\pm 25\%$ et l'énergie finale des variantes a été calculée. La rentabilité a été évaluée à partir des coûts annuels et l'écologie en fonction du besoin énergétique primaire et les équivalents d'émissions de CO₂.

L'analyse montre que pour les coûts annuels, la variante à 2 tubes (change over) est la moins chère mais la moins flexible. La variante à 4 tubes avec une distribution classique dirigée atteint des résultats presque identiques (+2% des coûts). La variante anergie représente la solution la moins attractive (+11% des coûts).

Les résultats écologiques sont proportionnels à la consommation énergétique. C'est pourquoi la variante à 4 tubes l'emporte sur le bilan des équivalents de CO₂ et de l'énergie primaire.

Le coût de la chaleur et du rafraîchissement se situe pour toutes les variantes entre 16,3 et 19,2 centimes/kWh et cela malgré une couverture complète de la puissance par les pompes à chaleur. Ces chiffres se situent dans une fourchette de rentabilité acceptable, principalement grâce à la vente de froid.

3 Ausgangslage

Die Energiestrategie 2050 sieht vor, sich von den fossilen Energieträgern weitgehend zu verabschieden und vermehrt erneuerbare Energien einzusetzen. Die CO₂-Emissionen sollen drastisch reduziert werden. Thermische Netze bieten ein hohes Potenzial an, vermehrt erneuerbare Energien zu nutzen, zu verteilen und so die definierten Ziele des Bundes zu erreichen. Im Programm «Thermische Netze» stellen sich, nebst der technischen und nicht-technischen Aspekte, Fragen nach der Systemwahl, insbesondere nach der Wahl der Netztemperaturen, der Zentralität der Aufbereitung, sowie der Anzahl der Leiter.

Im Februar 2018 wurde die Phase I des von eicher+pauli AG erarbeiteten Arbeitspaketes «Entscheidungsgrundlagen für die Systemwahl» abgeschlossen. Diese erste Phase beinhaltete Aussagen zur Systemwahl für die reine Wärmeversorgung mittels eines Verbunds für ein Altbau- und ein Neubauquartier. Für thermische Netze ist nun die Wahl der Netztemperatur bedeutend, wenn im Versorgungssperimeter ausser Wärmebedarf ebenfalls Kältebedarf vorhanden ist. Es stellt sich die Frage ob bei erhöhtem Kältebedarf bevorzugt die Netztemperaturen abgesenkt werden, oder ob ein alternatives Versorgungskonzept Vorteile bringt.

3.1 Ziel des Arbeitspakets

Ziel dieser zweiten Phase des Arbeitspakets ist die Gestaltung von Entscheidungskriterien für die Systemwahl bei thermischen Netzen, wenn ein Versorgungssperimeter mit Wärme und Kälte versorgt werden soll.

Aussagen zu folgenden Kriterien sollen daraus resultieren:

- Anordnung der Wärmearaufbereitung (zentrale oder dezentrale Temperaturerhöhung zur Beheizung / wo findet der Temperaturhub statt?)
- Aussagen zur Wahl der Netztemperatur in Abhängigkeit von der Art der Wärme- und Kälteversorgung und dem Temperaturniveau der Wärmekunden
- Wahl der Anzahl Leiter für das System

Dabei sollen die wirtschaftlichen und ökologischen Aspekte als Entscheidungskriterien herangezogen werden. In diesem Arbeitspaket wird die Betrachtung von reinem Wärmebedarf auf Kältebedarf erweitert. Die Vorgehensweise stützt sich auf die in der Phase I erarbeitete Methodik. Da das Thema Kältebedarf relativ neu und nicht einheitlich betrachtet ist, soll einleitend die grobe Situation Klimakältebedarf von Wohnbauten und Zweckbauten in der Schweiz dargestellt werden:

- Welches Potential besteht heute und in Zukunft für die Kälteversorgung des Gebäudeparks?
- Welcher Einfluss hat die Klimaerwärmung auf den Bedarf?
- Wie wird das Thema Kälte von Planern gehandhabt?

3.2 Vorgehensweise

Anhand einer Aufstellung hypothetischer Projekte von thermischen Netzen mit nur einer typischen Niedertemperaturquelle (z.B. Grundwasser) und typischen Bedarfssituationen werden folgende Parameter variiert:

- Temperaturniveau Wärmekunden (typisch Neubau Minergie-Standard und typisch Mischbauweise sanierter Altbau)
- Wärme- und Kälteaufbereitungssystem (zentral, zentral und dezentral, dezentral)
- Verschiedene Verteilsysteme (2-Leiter, 4-Leiter)
- Temperaturniveau primärseitige Wärmeverteilung als Funktion der Bedarfsanforderungen der Wärmekunden und des Wärmeaufbereitungssystems (geeignete minimale Vorlauf- und Rücklauftemperatur)

Für das zugrunde gelegte Versorgungsgebiet soll eine Bebauungsdichte verknüpft mit einer Anschlussdichte von min. 2 MWh/Trm*a für den Wärme- und Kälteabsatz herangezogen werden. Das Versorgungsgebiet soll möglichst real und möglichst häufigen Situationen in der Praxis entsprechen. Es kann von existierenden Projekten abgeleitet werden. Daraus ergeben sich auch real vorkommende Netztopologien.

Die technisch-wirtschaftliche Betrachtung der Berechnungsfälle führt zu hypothetischen Auslegungen für die Anlagen (Netz, apparative Ausrüstung etc.) auf der Basis marktgängiger oder marktreifer Komponenten. Damit können Vergleiche der einzelnen Fälle und Aussagen zur Gesamteffizienz erzielt werden.

Es wird von einer Bearbeitungstiefe ausgegangen, die prinzipielle Unterschiede der Betrachtungsfälle erkennen lässt. Wir gehen von Kosteninformationen aus, basierend auf Schätzkosten aus ähnlichen Vorhaben mit einer Genauigkeit der Investitionen für Anlagen und Netze von +/-25%.

3.3 Fragestellungen

In diesem Arbeitspaket soll eine Antwort zu folgender Fragestellung gefunden werden: Welches Verteilsystem und Aufbereitungssystem (zentral, zentral und dezentral, nur dezentral, Netztemperatur, Anzahl Leiter) ist für thermische Netze in Abhängigkeit von der Bedarfsstruktur wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaft?

3.4 Abgrenzungen

Nicht betrachtet werden im Besonderen:

- Unterschiedliche Wärmequellen
- Zusätzliche Temperaturniveaus der primärseitigen Wärmeversorgung
- Mischnutzungen

4 Zukünftige Kälteversorgung

Gemäss dem Bundesamt für Energie betrug der Endenergieverbrauch für Klima, Lüftung und Haustechnik (Hilfsenergie, Klimatisierung, Belüftung, Luftbefeuchtung und übrige Haustechnik) in der Schweiz im Jahr 2017 21.8 PJ.

Insgesamt macht der Endenergieverbrauch für Klima, Lüftung und Haustechnik 3% des gesamten Endenergieverbrauchs in der Schweiz aus und ist ca. 10-mal kleiner als der Endenergieverbrauch für die Raumwärme.

Entwicklung von 2000 bis 2017, in PJ

Verwendungszweck	2000	2017	Δ '00 - '17
Raumwärme	262.3	239.2	-8.8%
Warmwasser	46.5	45.8	-1.4%
Prozesswärme	95.4	95.3	-0.1%
Beleuchtung	25.0	25.3	1.3%
Klima, Lüftung & Haustechnik	17.9	21.8	21.6%
Information & Kommunikation, Unterhaltung	8.8	9.9	12.6%
Antriebe, Prozesse	68.1	69.7	2.4%
Mobilität Inland	224.6	235.8	5.0%
sonstige	14.4	20.6	43.0%
inländischer Endenergieverbrauch (ohne Pipelir)	762.9	763.4	0.1%
Tanktourismus	11.0	3.7	-66.5%
int. Flugverkehr	64.0	71.9	12.3%
Total Endenergieverbrauch	837.9	839.0	0.1%

Quelle: Prognos, TEP, Infrac 2018

Tabelle 1, Endenergieverbrauch nach Verwendungszwecken
(Tabelle 11 in Quellendokument)

Während aber der Endenergieverbrauch für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme stagniert oder sinkt, steigt der Endenergieverbrauch für Klima, Lüftung und Haustechnik deutlich an.

Die Studie «ClimaBau – Planen angesichts des Klimawandels; Energiebedarf und Behaglichkeit heutiger Wohnbauten bis ins Jahr 2100» vom Bundesamt für Energie (Schlussbericht, 29.12.2017) legt nahe, dass der Endenergiebedarf der Schweiz für die Klimatisierung auch in Zukunft weiter steigen wird. Die Studie kommt zum Ergebnis, dass sich der Heizwärmebedarf für Wohnbauten um 20-30% reduziert, der Klimakältebedarf hingegen deutlich steigt. Es wird davon ausgegangen, dass der Klimakältebedarf im Schweizer Mittelland im Jahr 2100 rund 50% des Heizwärmebedarfs betragen wird. Diese Entwicklung wird in Städten, aufgrund des städtischen Wärmeinseleffekts, noch stärker stattfinden.

In der aktuellen Norm SIA 180 wird davon ausgegangen, dass bei einer richtigen Projektierung und Ausführung eines Gebäudes mit mässigen, spezifischen, internen Wärmegewinnen keine aktive Kühlung benötigt wird. Betrachtet man die Norm SIA 382.1 und SIA 2024 kann man die Notwendigkeit einer Kühlung vereinfacht über die angenommenen internen Wärmegewinne nachweisen. Im vereinfachten Verfahren über die internen Wärmegewinne liegt für Ein- und Mehrfamilienhäuser keine Notwendigkeit zum Kühlen vor. Im Einzelfall kann aber jedes Gebäude separat mittels einer thermischen Simulation betrachtet werden. Liegt die Raumtemperatur für 100h im Jahr über der zulässigen maximalen Raumtemperatur, ist eine Kühlung notwendig. Unter Berücksichtigung der Klimaerwärmung muss davon ausgegangen werden, dass dieser Fall in Zukunft vermehrt eintreten wird. Selbst ohne Notwendigkeit ist aber eine Kühlung nach SIA 382-1 erlaubt, wenn der elektrische Leistungsbedarf maximal 7 W/m² Nettogeschossfläche (Bestand: 12 W/m²) beträgt.

Es gilt jedoch zu beachten, dass bei jeder Kühlung der sommerliche Wärmeschutz nach SIA 180 und SIA 382-1 gewährleistet sein muss. So kommt auch die Studie ClimaBau zum Schluss, dass für behagliche Temperaturen in Innenräumen in der Zukunft die Optimierung des Sonnenschutzes und der Nachtauskühlung sowie die des Gebäudeentwurf (insbesondere die Befensterung) eine zentrale Rolle spielen werden. Zum sommerlichen Wärmeschutz, welcher den Nutzenergiebedarf optimiert, kommt zusätzlich der Einsatz optimierter, energieeffizienter Kühlsysteme und die Wahl des Energieträgers. Energieeffiziente Systeme zum Kühlen haben einen grossen Einfluss auf den Endenergiebedarf. Hier gilt es insbesondere die Kombination von Kühlsystemen mit dem Heizsystem und mit PV-Anlagen anzustreben. Die Wahl des Energieträgers (Stromwahl) hat zusätzlich einen grossen Einfluss auf den Primärenergiebedarf.

5 Grundlagen

Folgende Grundlagen bilden die Basis der Arbeiten:

Bezeichnung	Grösse	Bemerkung
Auslegung Energiezentrale	95%	Gleichzeitigkeitsfaktor in Abhängigkeit der Anzahl Wärmeabnehmer
Wärmequelle	11 °C Konstant	Grundwasser, keine Beschränkung Grundwasserfassung
Stromaufnahme Hauptförderpumpe	2'200 Vollaststunden	
Kalkulationszinssatz	2.25%	
Technische Lebensdauer	15-50 Jahre	Nach Komponenten gemäss VDI-Richtlinie 2067
Inflation	0.5%	
Baukosten	385 CHF/m ³	Oberirdische Zentrale

Tabelle 2, Zusammenstellung Grundlagen

Weitere Grundlagen sind:

- Pflichtenheft Programm "Thermische Netze" vom 17.05.2018
- Startsituation vom 18.07.2018, inkl. aller Dokumente
- Zwischenbesprechung 1, vom 28.09.2018, inkl. aller Dokumente
- Zwischenbesprechung 2, vom 31.01.2019, inkl. aller Dokumente
- Grundlegenden Daten vom Wärmeverbund Augarten in AEW
- Primärenergie und CO₂-eq Faktoren gemäss Ökobilanzdaten im Baubereich KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016
- «Thermische Netze», Entscheidungskriterien für die Systemwahl, Schlussbericht 22. Februar 2018

6 Schnittstellen Betrachtung

Die vorliegende Studie betrachtet die wesentlichen Punkte der Wärmeverbunde. Folgende Schnittstellen bilden die Grenzen der Studie:

- Dezentrale, bauliche Kosten für die Unterstationen sind berücksichtigt
- Anlagenteile in der Unterstation bis und mit dem Temperaturhub sind berücksichtigt
- Das Wärmeabgabesystem der Liegenschaften ist nicht berücksichtigt
- Hilfsenergien, Strom für Regulierung etc., sind nicht berücksichtigt

7 Projektbeschreibung

7.1 Wärmequelle

Als Wärmequelle wird Grundwasser mit einer konstanten Temperatur von 11 °C angenommen. Die Temperaturspreizung zwischen Schöpfung und Rückführung darf 3 K nicht überschreiten¹.

7.2 Gebäudenutzungen

Die Nutzung und das damit verbundene Nutzungsprofil sind auf die Nutzung «Verwaltung» reduziert.

Es handelt sich um ein Neubaugebiet (Baustandart MukEN 2014).

Da die Nutzung «Wohnen EFH» gem. SIA 2024 kein Kältebedarf vorweist, wird auf eine Mischnutzung verzichtet. Es wird im Perimeter angenommen, dass es sich nur um Gebäude der Nutzung «Verwaltung» handelt.

Be- und Entfeuchtung sind ausgeklammert.

7.3 Perimeter

Um der Realität möglichst nahe zu kommen, ist ein Perimeter aus dem real existierenden AEW Wärmeverbund Augarten in Rheinfelden² gewählt. Der Netzaufbau ist nicht genau derselbe, kommt diesem aber nahe.

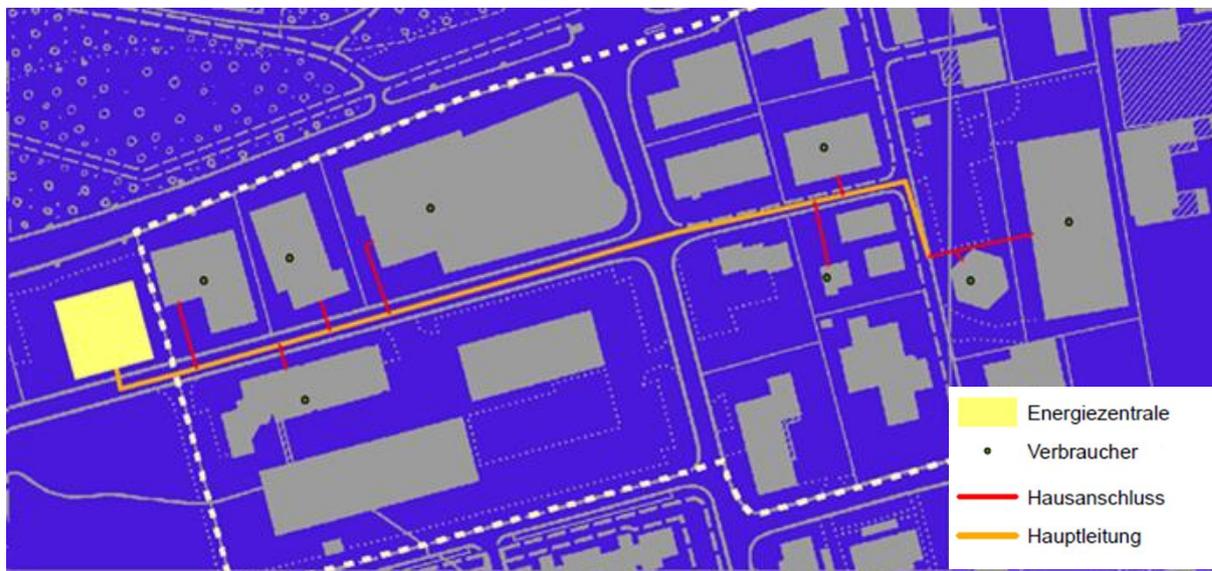


Abbildung 1: Perimeter

¹ Eidg. Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998, Anhang 2

² Wärmeverbund Augarten Weiherfeld, Abwärmenutzung ARA Rheinfelden, AEW Energie AG, Nutzung der Daten durch AEW am 18.09.2017 bewilligt.

Die Energiezentrale ist oberirdisch und liegt unmittelbar bei dem Perimeter um lange Wege zu vermeiden.

Folgend sind die normierten Parameter aufgeführt:

Nutzung	Verwaltung
Meteostation	Basel-Binningen
Gebäudestandart	MuKdEN 2014
Anzahl Unterstationen	8
Hauptleitung	335 Trm
Hausanschluss	150 Trm
Trasse Meter (Summe)	485 Trm

Tabelle 3, Grundlagen Perimeter

7.4 Energie- und Leistungsbedarf

Als Basis für die Berechnung des Wärme- und Kältebedarfs dienen die acht Gebäude des im letzten Kapitel aufgezeigten Perimeters. Diese Grundflächen sind mit den in Rheinfeldern zulässigen Stockwerken multipliziert. Das Resultat bildet die Nettogeschossflächen des gesamten Perimeters.

Grundlagen			
Haus	Grundfläche	Geschosse	Netto Geschossfläche
	[m ²]		[m ²]
1	852	5	4'260
2	910	5	4'550
3	1'110	5	5'550
4	106	5	530
5	640	5	3'200
6	338	5	1'690
7	2'052	5	10'260
8	4'032	5	20'160
Total			50'200

Tabelle 4, Gebäudeflächen

Um den Wärme- und Kältebedarf in Relation setzen zu können wurde die Berechnungsmethode mittels SIA 2024 gewählt und mit dem SIA-Gebäudetool berechnet.

Mittels typischer Raumnutzungen und deren Anteile in Verwaltungsgebäuden, sind mit SIA Standardwerten, die Energie und Leistung berechnet.

Bei der Plausibilisierung sind tiefe Volllaststunden im Wärmebereich aufgefallen. Nach Rücksprache mit dem SIA besteht eine Diskrepanz zwischen der Wärmeleistungsberechnung und der Berechnung des Wärmebedarfs. Aufgrund dessen wurde entschieden, den Wärmebedarf zu verdoppeln. Dadurch ergibt sich ein Wärmebedarf für RW+TWW von 31.9 kWh/m²/Jahr. Dies entspricht gemessenen Werten in vergleichbaren, bestehenden Gebäuden für den Wärmebedarf.

Räume		Fläche			Raumkühlung		Raumheizung		Warmwasser	
Nr.	Raumnutzung (SIA 2024)	EBF	NGF m ²	Anteil %	Leistung kW	Energie MWh	Leistung kW	Energie MWh	Bedarf l/d	Energie MWh
3.1	Einzel-, Gruppenbüro		16'000	32%	432.0	213.6	460.4	403.9	3'429	41.5
3.2	Grossraumbüro		16'000	32%	416.0	329.4	374.8	160.4	4'800	58.1
3.3	Sitzungszimmer		1'600	3%	67.2	17.2	92.5	39.3	0	0.0
3.4	Schalterhalle, Empfang		800	2%	17.6	10.3	17.0	11.1	0	0.0
12.1	Verkehrsfläche		800	2%	0.0	0.0	8.9	2.7	0	0.0
12.3	Treppenhaus		1'600	3%	0.0	0.0	37.9	8.6	0	0.0
12.7	WC		400	1%	0.0	0.0	21.1	16.2	0	0.0
12.4	Nebenraum		4'800	10%	0.0	0.0	59.0	49.2	0	0.0
12.12	Serverraum		200	0%	20.2	136.0	1.9	0.0	0	0.0
12.9	Parkhaus		8'000	16%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
				0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
				0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
				0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
Total			50'200	100%	953.0	706.4	1'073.4	691.5	8'229	99.7
Werte aus anderen Quellen								1'383.0		
Rechenwert			50'200		953.0	706.4	1'073.4	1'383.0	8'229	99.7

Anteil Konstruktionsfläche	%	10
Geschossfläche (GF)	m ²	55220
Energiebezugsfläche (EBF)	m ²	46420

W/m ²	kWh/m ²	W/m ²	kWh/m ²		kWh/m ²
20.5	15.2	23.1	29.8		2.1

Tabelle 5, Auszug aus dem Gebäudetool SIA 2024

Im unteren Diagramm ist der Leistungsverlauf von Wärme- und Kälte in Abhängigkeit der Temperatur und den approximativen Jahresstunden dargestellt. Die Fläche unter den Kurven bildet den Energiebedarf.

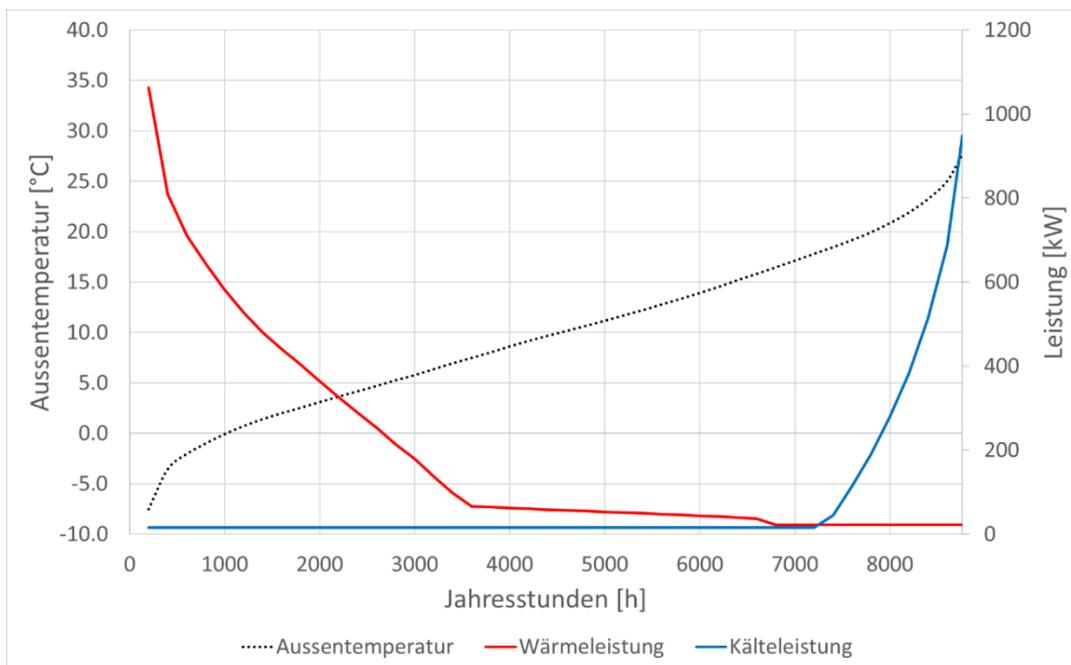


Abbildung 2, Summenhäufigkeitsdiagramm Wärme- und Kältebedarf

Damit sind Energie- und Leistungsbedarf des Perimeters gegeben:

Wärmebedarf:	1'583 MWh/Jahr
Wärmeleistungsbedarf:	1'073 kW
Kältebedarf	706 MWh/Jahr
Kälteleistungsbedarf	953 kW

7.5 Wärmeerzeugung Trinkwarmwasser

Wie in einem Verwaltungsgebäude zu erwarten, besteht auch hier ein niedriger TWW- und PK-Bedarf. Hohe Investitionen sind daher zu vermeiden. Aufgrund des niedrigen TWW-Bedarfs sind bei einer Warmwasserverteilung sehr hohe Wärmeverluste von ca. 100% zu erwarten. Der Nutzungsgrad eines WP-Wassererwärmers liegt gem. SIA 2024 Gebäudetool (Erzeugung) bei 2.2., dazu kommt noch Hilfsenergie von 2%. Wird dies berücksichtigt, ist der Strombedarf fast gleich hoch, wie wenn die Energie direkt elektrisch, aber bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt wird. Nur sind für die direkt elektrische Variante keine Investitionen in eine Wärmepumpe und in ein TWW-Verteilnetz nötig.

Da in diesem Fall ein TWW-Verteilssystem keinen energetischen Vorteil bringt und die Investitionen gegenüber dezentralen Durchlauferhitzern viel höher sind, wird auf eine Trinkwarmwasserverteilung in allen Varianten verzichtet.

7.6 Lineare Wärmedichte

Die lineare Wärmedichte ist mit der gesamten Energie (Wärme und Kälte) und den Trasseemeter des Netzes berechnet, da die gesamte Energie auch verkauft wird.

Trassee-Meter	485 Trm (Hauptleitung und Hausanschlüsse)
Wärme- + Kältebedarf	1'583 MWh/Jahr + 706 MWh/Jahr = 2290 MWh/Jahr
Lineare Wärmedichte	4.72 MWh/Trm/Jahr

7.7 Temperaturen Bedarf

Die Temperaturen der Wärmekunden sind sekundärseitig wie folgt definiert:

	Aussentempera- tur	Vorlauftemperatur	Rücklauftemperatur
Raumwärme (inkl. Lüftung)	-7°C	35°C	28°C
Trinkwarmwasser		60°C	
Klimakälte	32°C	18°C	22°C
Prozesskälte		18°C	22°C

Tabelle 6, Temperaturen Wärmekunden

Die Systemtemperaturen sind abhängig von den Wärmeabgabesystemen in den Gebäuden.

Da es sich um einen Neubauperimeter handelt, kann der Gebäudeplaner diese Temperaturen als Vorgabe für die Auslegung des Systems annehmen.

Sollten tiefere Temperaturen nötig sein, müssen Anlagen zur Temperaturerhöhung oder -Senkung in der jeweiligen Liegenschaft sekundärseitig gebaut werden.

Alle diese Temperaturen wurden in realen Projekten von e+p bereits erfolgreich umgesetzt.

7.8 Gleichzeitigkeit

Bei zentralen Lösungen wirkt ein Gleichzeitigkeitsfaktor auf die Auslegung der Energiezentrale. Dieser ist hauptsächlich abhängig von der Anzahl Wärmekunden und wird in der Auslegung berücksichtigt. Folgendes Diagramm dient der Annahme als Grundlage:

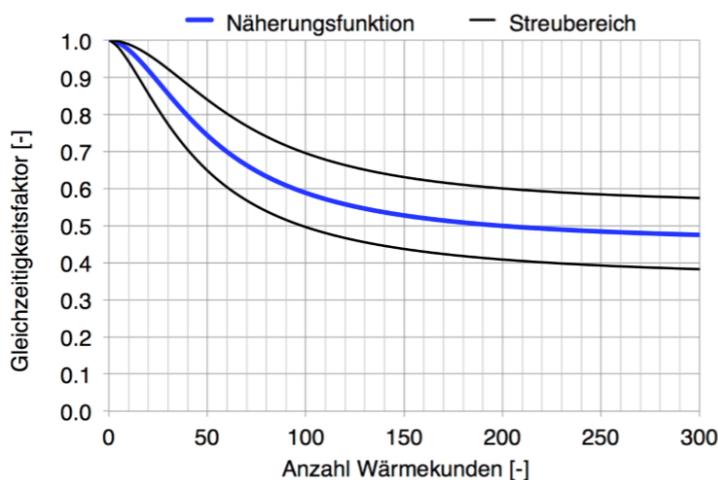


Abbildung 3, Näherungsfunktion und Streubereich für den Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors in Abhängigkeit der Anzahl Wärmeabnehmer, Quelle: Planungshandbuch Fernwärme, 6. April 2017, S. 109

Bei acht Wärmekunden ergibt das eine Gleichzeitigkeit von 95%. Die Energiezentrale und die Hauptleitungen können in dem Fall auf 95% der eigentlichen Leistung dimensioniert werden. Dies ist in der Studie berücksichtigt.

7.9 Fossile Spitzendeckung

Aufgrund der tiefen Vorlauftemperatur für die Raumwärme ist keine fossile Spitzendeckung betrachtet.

7.10 Dimensionierung Anlagenelemente

Alle Anlagenelemente (Pumpen, Rohre, etc.) sind mit branchenüblichen Methoden dimensioniert. Die wichtigsten Werte für die Dimensionierung der Anlagenelemente sind in der folgenden Tabelle eingefügt:

Druckverlust warme Fernleitungsrohre	Max. 250 Pa/m
Druckverlust kalte Fernleitungsrohre	Max. 100 Pa/m
Grädigkeit Grundwasser-Systemtrennung	1K
Grädigkeit Fernwärme Primärseite zu Sekundärseite Unterstationen	2K
WP-Speicher	Ausgelegt auf Taktbetrieb einer WP, Unterstationen sowie Zentrale Lösungen

Abbildung 4, Grundlagen Dimensionierung

7.11 Verteilverluste

Die Wärme wird auf dem maximalen Niveau von 40°C verteilt. Die Verluste sind berechnet, haben aber einen Anteil von ca. 0.3% auf die Leistung und haben daher marginalen Einfluss auf die Wärmeerzeuger. Für die Auslegung ist trotzdem 1K Temperaturverlust berücksichtigt.

7.12 Wärmerückgewinnung

Da ein Wärme- wie auch Kältebedarf besteht, sollen die Konzepte Gleichzeitigkeiten möglichst gut ausnützen. Insbesondere sollte so wenig Grundwasser wie möglich genutzt werden. Dies wird in der Erstellung der Varianten berücksichtigt.

7.13 Redundanz

7.13.1 Wärme

Da keine fossile Spitzendeckung eingesetzt wird, muss eine Wärmepumpe den gesamten Leistungsbedarf decken. Die Investition ist in dem Fall höher als wenn fossile Energien wie Gas- oder Heizölkessel zur Spitzendeckung die Hälfte der Leistung übernehmen würden. Ein System mit einer Redundanz von Beispielsweise $n+1$ ist daher höchst unwirtschaftlich. Daher sind in der vorliegenden Studie bei zentralen Varianten mobile Heizzentralen vorgesehen, die innert einem Arbeitstag die nötige Leistung erbringen können.

7.13.2 Kälte

Für die Kälteanlagen ist keine Redundanz vorgesehen.

7.14 JAZ (WP-Esti) für Raumwärme

Die Jahresarbeitszahlen für Raumwärme und Warmwasser sind mit dem Berechnungsprogramm WPEsti³ berechnet. In der Berechnung ist der Pumpenstrom für die Grundwasserfassung enthalten. Der Pumpenstrom der Hauptversorgungspumpen ist mit 2'200 Volllaststunden pro Jahr berücksichtigt. Die Berechnungsblätter sind im Anhang zu finden.

7.15 Anlagenkonzepte (Varianten)

Alle Konzepte sind mit Konzeptschemas im Bericht in den Varianten beschrieben. Es liegen e+p intern synoptische Prinzipschemas vor. Mit diesen lassen sich die hydraulischen Ansprüche der Varianten diskutieren und im Vergleich mit realisierten Projekten gewährleisten, dass die hier vorgeschlagenen Varianten durchführbar sind. Diese Schemas werden nicht veröffentlicht, da sie die Phase zu tief darstellen und somit die Gefahr besteht, dass diese in Bauprojekten ohne Zutun von e+p 1:1 übernommen werden.

³ Link zur aktuellen Version: <https://www.endk.ch/de/fachleute-1/hilfsmittel>

7.15.1 Variantenmatrix

Die Grundfrage der Arbeit lautet: «Welches Verteilsystem und Aufbereitungssystem (zentral, zentral und dezentral, nur dezentral, Netztemperatur, Anzahl Leiter) ist für thermische Netze in Abhängigkeit von der Bedarfsstruktur wirtschaftlich und ökologisch verteilhaft?»

Für die Beantwortung dieser Frage sind drei Konzepte definiert:

- Variante 4-Leiter, Energieverteilung mit separatem Wärme- und Kältenetz, Zentrale Aufbereitung von Raumwärme
- Variante 2-Leiter, Energieverteilung mit einem Netz mit Umschaltung von Heiz- und Kühlbetrieb
- Variante Anergie, Energieverteilung auf Niedertemperaturniveau, Temperaturhub bei den Unterstationen.

Um die grundlegenden technischen Unterschiede der Konzepte überschaubar darzustellen, sind diese in der unteren Matrix dargestellt.

Varianten		4-Leiter	2-Leiter	Anergie
Raumwärme	zentral	X	X	
	dezentral			X
Warmwasser	zentral			
	dezentral	X	X	X
Klimakälte	zentral	X	X	X
	dezentral			
Prozesskälte	zentral	X	X	X
	dezentral		X	
Fluidströmung	gerichtet	X	X	
	ungerichtet			X
Energiefluss	unidirektional	X	X	
	bidirektional			X
Unterstationen	direkt			X
	indirekt	X	X	
Anzahl Leiter	2 – Leiter		X	X
	4 – Leiter	X		

Tabelle 7, Variantenmatrix

Die Varianten unterscheiden sich grundlegend bei der Wärme- und Kälteverteilung. Die Variante 4-Leiter kann gleichzeitig im Areal heizen und kühlen, wobei die Variante 2-Leiter nach dem Umschaltzeitpunkt in der Übergangsphase von Heiz- auf Kühlbetrieb umstellt. Die Variante Anergie fördert kalte Fernwärme zu den Unterstationen, wo dezentral der Temperaturhub stattfindet.

In den nachfolgenden Kapiteln sind die Varianten technisch beschrieben.

7.15.2 Variante 4-Leiter

Der Temperaturhub für die RW erfolgt in der Energiezentrale. Die Wärmeerzeugung erfolgt monovalent mit einer Grundwasser-Wärmepumpe. Die Abgabe an die Unterstationen ist mittels PWT indirekt gelöst. Das TWW wird aufgrund der tiefen Bandlast dezentral direkt elektrisch gelöst.

Varianten		4-Leiter
Raumwärme	zentral	X
	dezentral	
Warmwasser	zentral	
	dezentral	X
Klimakälte	zentral	X
	dezentral	
Prozesskälte	zentral	X
	dezentral	
Fluidströmung	gerichtet	X
	ungerichtet	
Energiefluss	unidirektional	X
	bidirektional	
Unterstationen	direkt	
	indirekt	X
Anzahl Leiter	2 – Leiter	
	4 – Leiter	X

Tabelle 8, Variantenmatrix 4-Leiter

Bei Auslegungsaussentemperatur wird die Vorlauftemperatur mit 39°C gefahren. Mit Leitungsverlusten und der Grädigkeit im PWT der Unterstation wird somit sekundär eine VL-Temperatur von 35°C erreicht.

Energie- und Leistungsbedarf Perimeter

Wärmebedarf:	1'583 MWh/Jahr
Leistungsbedarf:	1'073 kW
Kältebedarf	706 MWh/Jahr
Kälteleistungsbedarf	953 kW

Heiz- & Kühlfall

Im Heizfall (Winter) liefert die Grundwasser-Wärmepumpe die Wärme für die RW. Das TWW wird dezentral gelöst. Die PK wird über das Grundwasser abgedeckt.

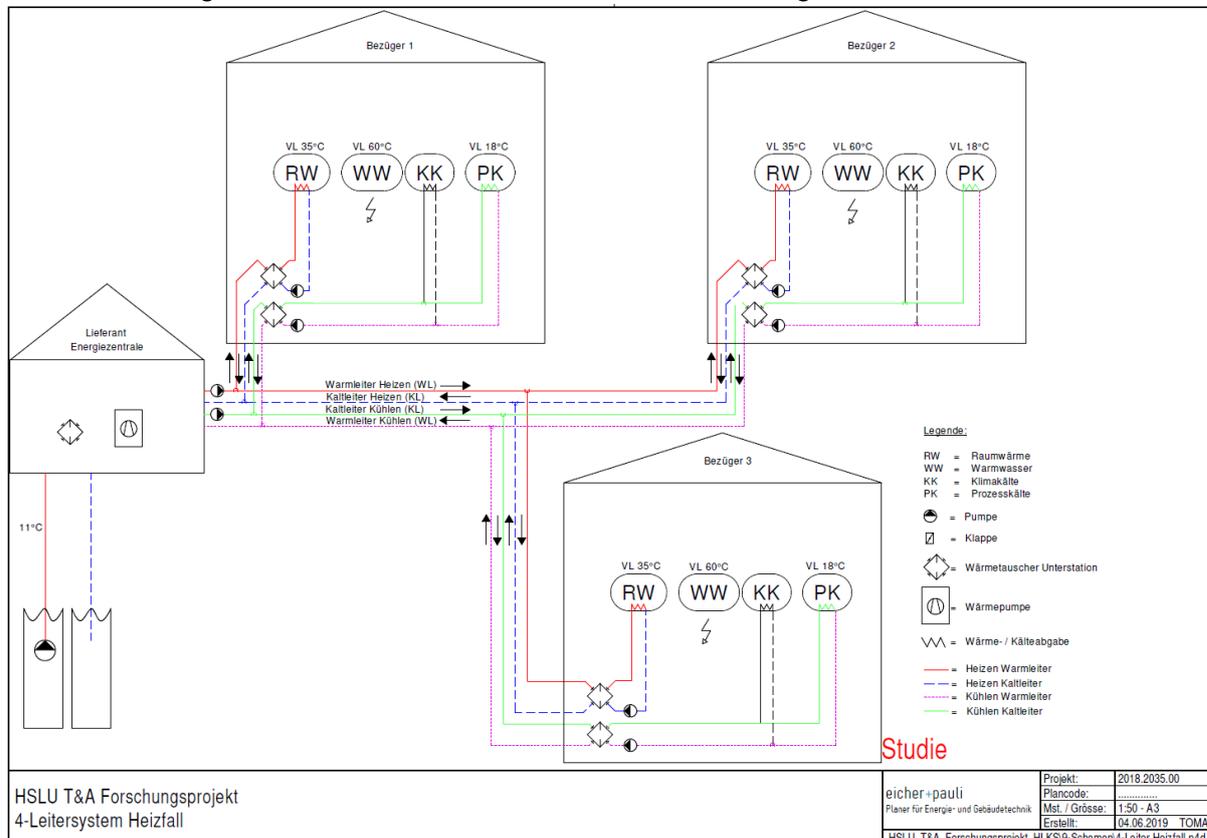


Abbildung 5, Schema 4-Leiter Heizfall

Im Kühlfall (Sommer) ist die Grundwasser-Wärmepumpe ausser Betrieb, da die RW keinen Bedarf hat. Das Grundwasser deckt den Bedarf von KK und PK.

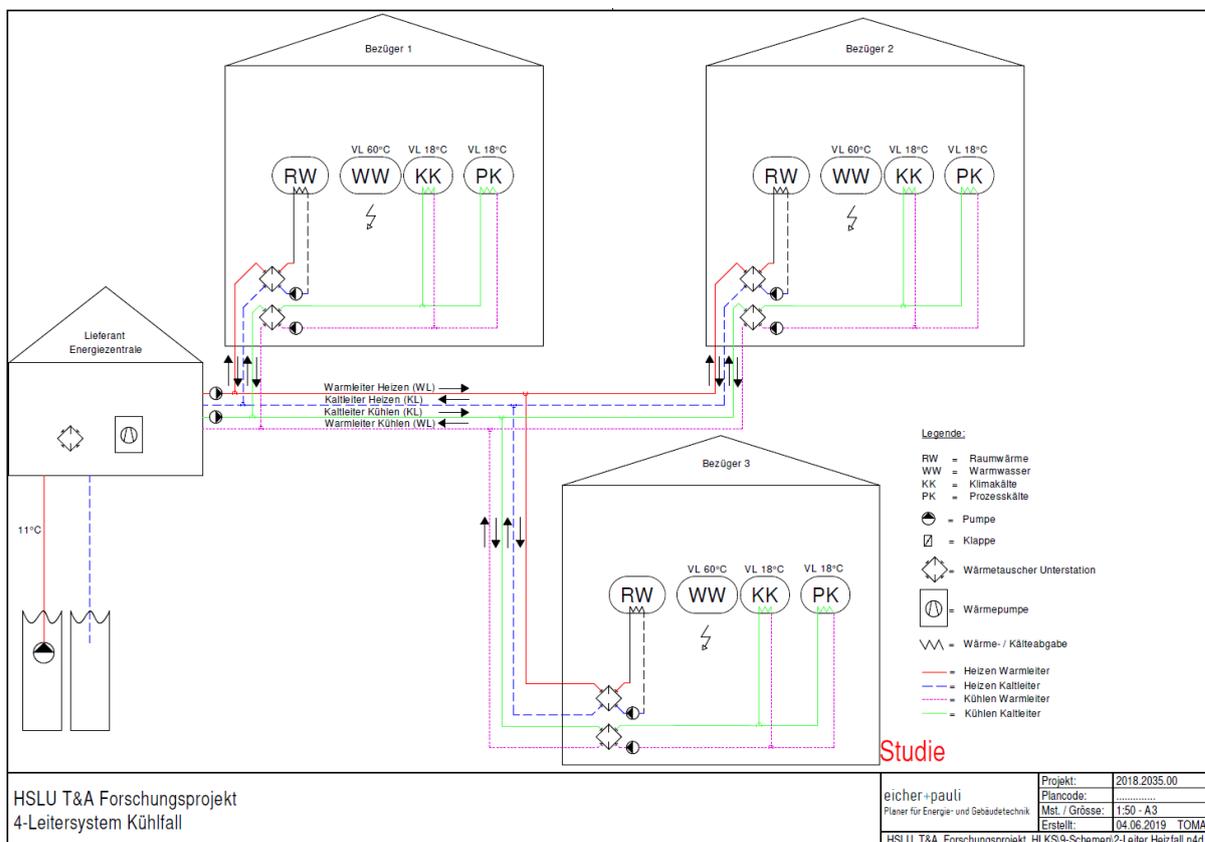


Abbildung 6, Schema 4-Leiter Kühlfall

Auslegung Wärmeerzeugung

Energieabdeckung	[kW]	[MWh]	Anteil an Energie
Wärmepumpe NH3	1'100	1'384	87%
Wärmepumpe HFO	-	0	0%
TW-Wassererwärmer (direkt-elektrisch)	25	199	13%

Energieabdeckung	[kW]	[MWh]	Anteil an Energie
GW-Freecooling	952	706	100%
Kältemaschine PK	-	0	0%

Jahresarbeitszahl (JAZ)

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe wurde mit dem Programm WPesti Anhang [1] für die RW berechnet. Inbegriffen ist neben dem Strom für die Wärmepumpe auch der Strom für die Grundwasserpumpe. Es handelt sich um eine Ammoniak-Wärmepumpe. Die Förderpumpe wird mit 2'200 VLS separat dem Energiebedarf der Energiezentrale hinzugefügt.

JAZ NH3	5.0
JAZ Kälte	15.0 ⁴

Energie- und Leistungsbedarf Energiezentrale

Mit den oben berechneten Energie- und Effizienzzahlen ist der jährliche Endenergiebedarf eruiert worden:

Elektrizität WP-RW	291 MWh/Jahr
Hauptvorlaufpumpe	12 MWh/Jahr
Kälte	47 MWh/Jahr
Summe Elektrizität	350 MWh/Jahr

Die elektrische Leistungsaufnahme hat einen Einfluss auf die Betriebskosten eines Wärmeverbunds, daher wird diese hier angegeben und ist in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt. Ausgewiesen sind die wichtigsten Strom-/ Wärmekunden, nicht berücksichtigt sind elektrische Leistungen für Hilfsbetriebe.

GW-Pumpe	8 kW
WP	262 kW
Hauptvorlaufpumpe	8 kW
Summe	278 kW

⁴ Gem. SIA 2024 Gebäudetool, Blatt Erzeugung, Direktkühlung Grundwasser

7.15.3 Variante 2-Leiter

Der Temperaturhub für die RW erfolgt in der Energiezentrale. Die Wärmeerzeugung erfolgt monovalent mit einer Grundwasser-Wärmepumpe. Die Abgabe an die Unterstationen ist mittels PWT indirekt. Das TWW wird aufgrund der relativ tiefen Leistungen dezentral gelöst.

Varianten		2-Leiter
Raumwärme	zentral	X
	dezentral	
Warmwasser	zentral	
	dezentral	X
Klimakälte	zentral	X
	dezentral	
Prozesskälte	zentral	X
	dezentral	X
Fluidströmung	gerichtet	X
	ungerichtet	
Energiefluss	unidirektional	X
	bidirektional	
Unterstationen	direkt	
	indirekt	X
Anzahl Leiter	2 – Leiter	X
	4 – Leiter	

Tabelle 9, Variantenmatrix 2-Leiter

Bei Auslegungsaussentemperatur wird die Vorlauftemperatur mit 39°C gefahren. Mit Leitungsverlusten und der Grädigkeit im PWT der Unterstation wird somit sekundär eine VL-Temperatur von 35°C erreicht.

Energie- und Leistungsbedarf Perimeter

Wärmebedarf:	1'583 MWh/Jahr
Leistungsbedarf:	1'073 kW
Kältebedarf	706 MWh/Jahr
Kälteleistungsbedarf	953 kW

Heiz- & Kühlfall

Im Heizfall (Winter) liefert die zentrale Grundwasser-Wärmepumpe die Wärme für die RW. Das TWW wird dezentral gelöst. Die PK wird mittels dezentraler Kältemaschinen abgedeckt.

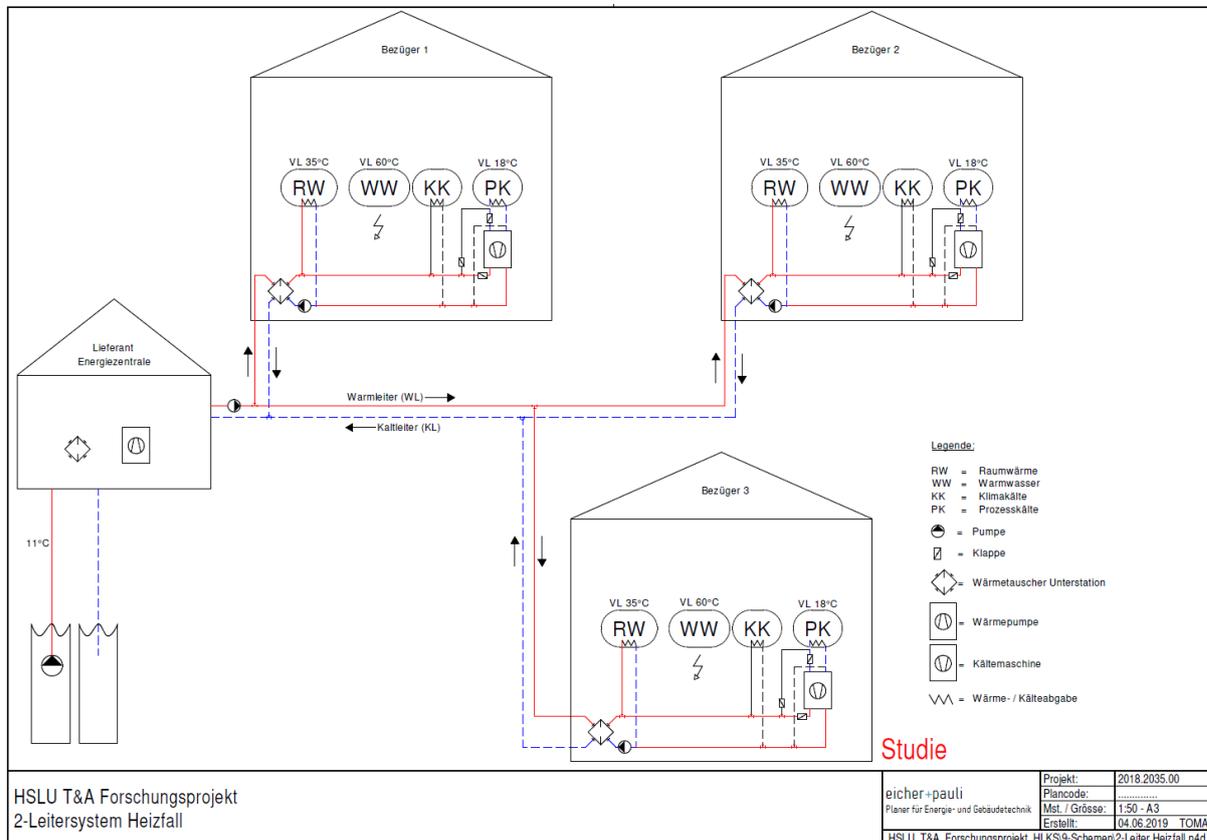


Abbildung 7, Schema 2-Leiter Heizfall

Im Kühlfall (Sommer) ist die Grundwasser-Wärmepumpe ausser Betrieb, da die RW keinen Bedarf hat. Das Grundwasser deckt den Bedarf von KK und PK.

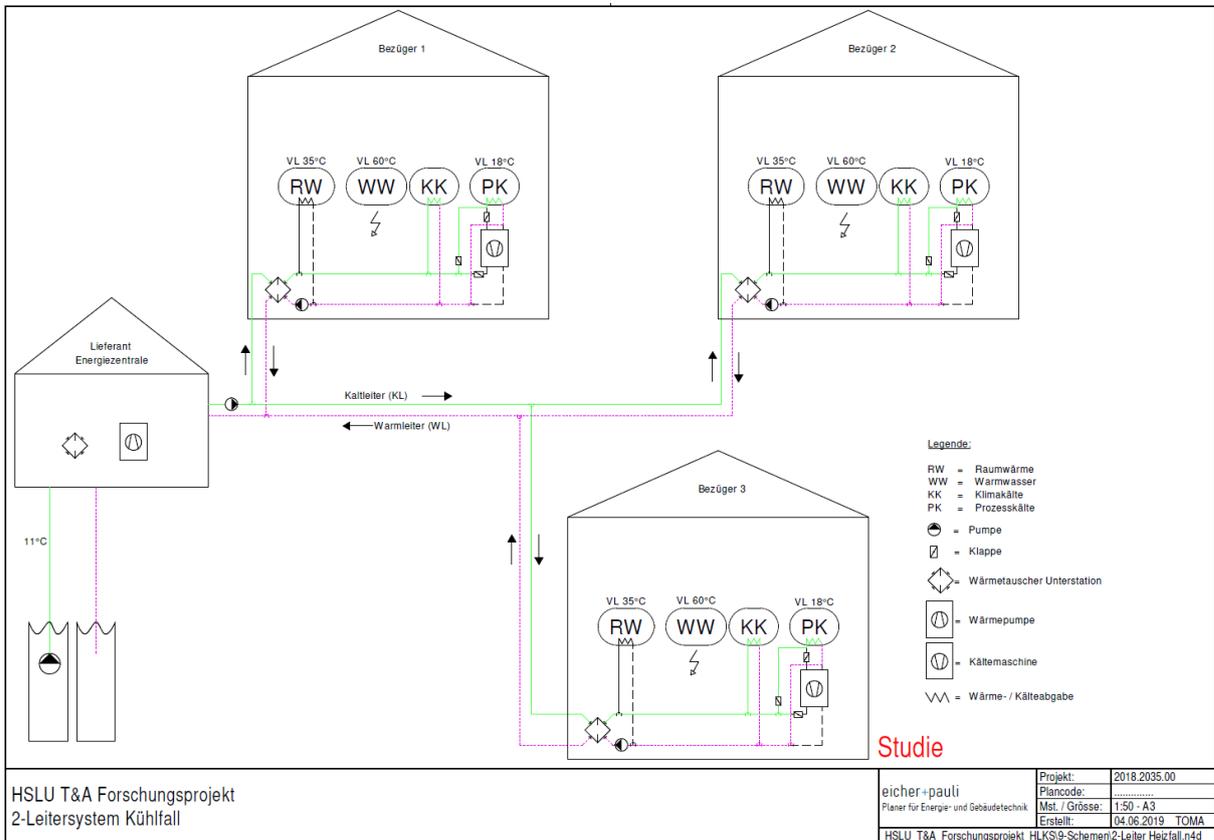


Abbildung 8, Schema 2-Leiter Kühlfall

Auslegung Wärmeerzeugung

Energieabdeckung	[kW]	[MWh]	Anteil an Energie
Wärmepumpe NH3	1'100	1'384	87%
Wärmepumpe HFO	-	0	0%
TW-Wassererwärmer (direkt-elektrisch)	25	199	13%

Energieabdeckung	[kW]	[MWh]	Anteil an Energie
GW-Freecooling	952	606	86%
Kältemaschine PK	20	100	14%

Jahresarbeitszahl (JAZ)

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe wurde mit dem Programm WPesti Anhang [1] für die RW berechnet. Inbegriffen ist nebst dem Strom für die Wärmepumpe auch der Strom für die Grundwasserpumpe. Es handelt sich um eine Ammoniak-Wärmepumpe. Die Förderpumpe wird mit 2'200 VLS separat dem Energiebedarf der Energiezentrale hinzugefügt.

JAZ WP	5.2
JAZ Kälte	15.0 ⁵

Energie- und Leistungsbedarf Energiezentrale

Mit den oben berechneten Energie- und Effizienzzahlen ist der jährliche Endenergiebedarf eruiert worden:

Elektrizität WP-RW	291 MWh/Jahr
Hauptvorlaufpumpe	12 MWh/Jahr
Kälte	47 MWh/Jahr
Summe Elektrizität	350 MWh/Jahr

Die elektrische Leistungsaufnahme hat einen Einfluss auf die Betriebskosten eines Wärmeverbunds, daher wird diese hier angegeben und ist in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt. Ausgewiesen sind die wichtigsten Strom-/Wärmekunden, nicht berücksichtigt sind elektrische Leistungen für Hilfsbetriebe.

GW-Pumpe	8 kW
WP	262 kW
Hauptvorlaufpumpe	8 kW
Summe	278 kW

⁵ Gem. SIA 2024 Gebäudetool, Blatt Erzeugung, Direktkühlung Grundwasser

7.15.4 Variante Anergie

In der Variante Anergie wird die Energie vom Grundwasser im Anergienetz gefördert. Der Temperaturhub für die RW erfolgt mittels dezentralen HFO-Wasser-Wasser-Wärmepumpen. Das TWW wird aufgrund der tiefen Bandlast dezentral gelöst.

Varianten		Anergie
Raumwärme	zentral	
	dezentral	X
Warmwasser	zentral	
	dezentral	X
Klimakälte	zentral	X
	dezentral	
Prozesskälte	zentral	X
	dezentral	
Fluidströmung	gerichtet	
	ungerichtet	X
Energiefluss	unidirektional	
	bidirektional	X
Unterstationen	direkt	X
	indirekt	
Anzahl Leiter	2 – Leiter	X
	4 – Leiter	

Tabella 10, Variantenmatrix Anergie

Energie- und Leistungsbedarf Perimeter

Wärmebedarf:	1'583 MWh/Jahr
Leistungsbedarf:	1'073 kW
Kältebedarf	706 MWh/Jahr
Kälteleistungsbedarf	953 kW

Heiz- & Kühlfall

Im Heizfall (Winter) dient das Anergienetz als Quelle für die dezentralen Wärmepumpen für die RW. Das TWW wird dezentral gelöst. Die PK wird direkt über das Grundwasser abgedeckt.

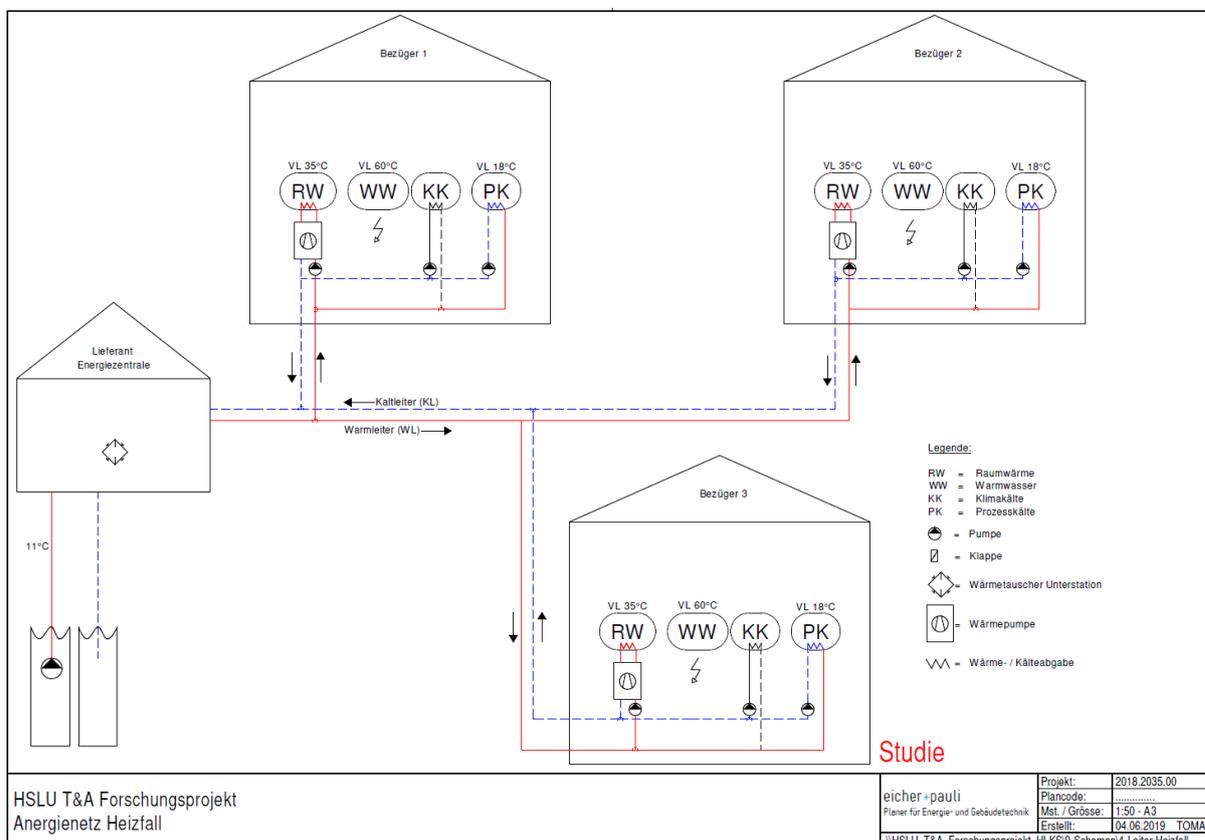


Abbildung 9, Schema Anergienetz Heizfall

Im Kühlfall (Sommer) sind die dezentralen Wärmepumpen ausser Betrieb, da die RW keinen Bedarf hat. Das Grundwasser deckt den Bedarf von KK und PK. In diesem Fall ist die Kühlleistung und somit der Volumenstrom gegenüber der Heizleistung grösser. Damit dreht die Fliessrichtung des Netzes.

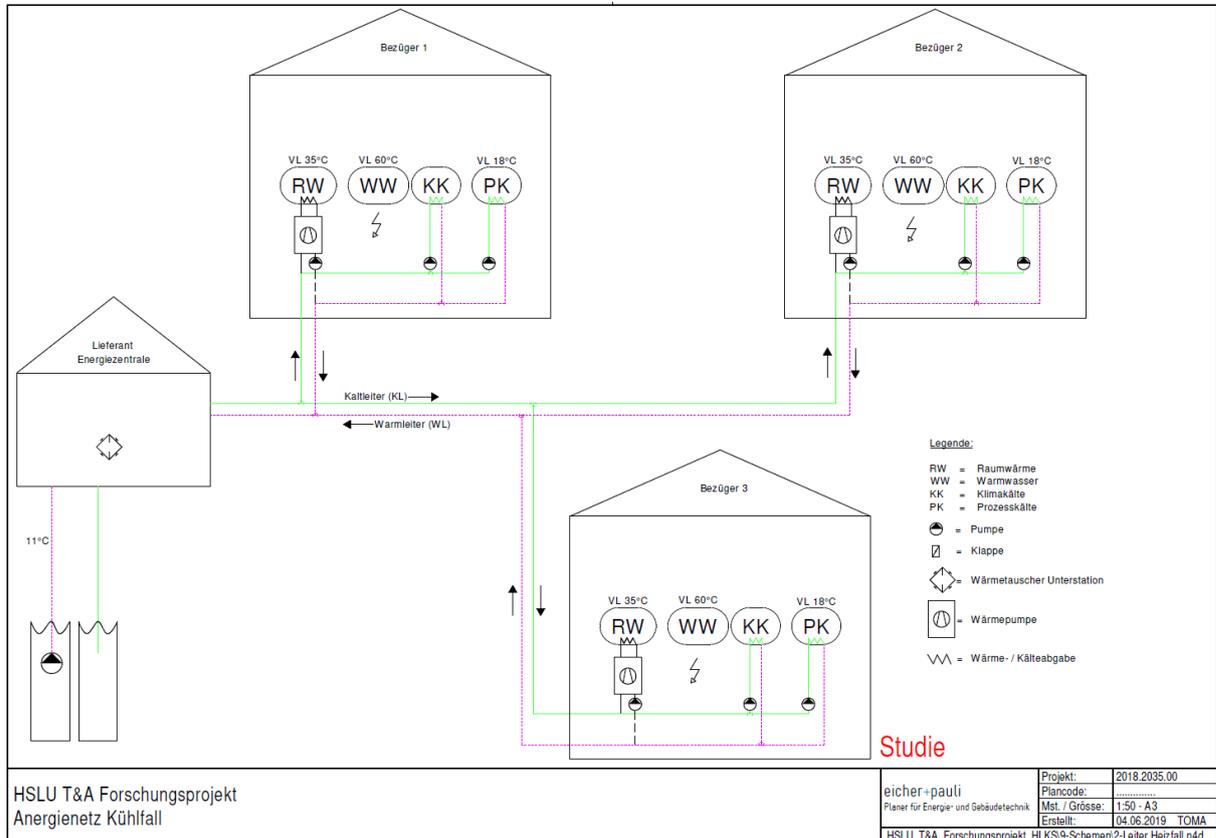


Abbildung 10, Schema Anergienetz Kühlfall

Wahl des Kältemittels

Das Areal wird als Ganzes betrachtet und die Schnittstellen sind bei allen Varianten auf der Sekundärseite nach dem Temperaturhub. Die gesamte Leistung wird von einem Anbieter zur Verfügung gestellt. Es wird daher nur auf Kältemittel zurückgegriffen, welche die der ChemRRV 2018 im Leistungsbereich von 1'073 kW Wärme entsprechen. Das sind im wesentlichen natürliche Kältemittel und HFO. Im unteren Leistungsbereich der Unterstationen (10-450 kW) sind natürliche Kältemittel standardmässig schwierig einzusetzen. Es bietet sich also HFO an. Dieses hat nahezu die gleichen Sicherheitsanforderungen wie Ammoniak.

Auslegung Wärmeerzeugung

Energieabdeckung	[kW]	[MWh]	Anteil an Energie
Wärmepumpe NH3	-	0	0%
Wärmepumpe HFO	1'100	1'3840	87%
TW-Wassererwärmer (direkt-elektrisch)	25	199	13%

Energieabdeckung	[kW]	[MWh]	Anteil an Energie
GW-Freecooling	952	706	100%
Kältemaschine PK	-	0	0%

Jahresarbeitszahl (JAZ)

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe wurde mit dem Programm WPesti Anhang [2] für die RW berechnet. Inbegriffen ist neben dem Strom für die Wärmepumpe auch der Strom für die Grundwasserpumpe. Es handelt sich bei den dezentralen Wärmepumpen um HFO-Wärmepumpen. Die Förderpumpe wird mit 2'200 VLS separat dem Energiebedarf der Energiezentrale hinzugefügt.

JAZ WP	5.2
JAZ Kälte	15.0 ⁶

Energie- und Leistungsbedarf Energiezentrale

Mit den oben berechneten Energie- und Effizienzzahlen ist der jährliche Endenergiebedarf eruiert worden:

Elektrizität WP-RW	291 MWh/Jahr
Hauptvorlaufpumpe	12 MWh/Jahr
Kälte	47 MWh/Jahr
Summe Elektrizität	350 MWh/Jahr

Die elektrische Leistungsaufnahme hat einen Einfluss auf die Betriebskosten eines Wärmeverbunds, daher wird diese hier angegeben und ist in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt. Ausgewiesen sind die wichtigsten Strom-/Wärmekunden, nicht berücksichtigt sind elektrische Leistungen für Hilfsbetriebe.

GW-Pumpe	8 kW
WP	262 kW
Hauptvorlaufpumpe	8 kW
Summe	278 kW

⁶ Gem. SIA 2024 Gebädetool, Blatt Erzeugung, Direktkühlung Grundwasser

8 Wirtschaftlichkeit & Ökologie

Der wirtschaftliche Vergleich aller Massnahmen dient als wichtigstes Kriterium für die Systemwahl. Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit erfolgt mittels der dynamischen Annuitätenmethode und damit über den Vergleich der Jahreskosten. Diese setzen sich aus den Energie-, Instandhaltungs- und Kapitalkosten zusammen.

Die Energiekosten sind ausschliesslich die Stromkosten der Wärmeerzeuger und der Verteilung. Diese richten sich nach den aktuellen Zahlen des Marktes.

Die Abschätzung Wartungs- und Instandhaltungskosten eines prozentualen Faktors auf die Investitionen erfolgt nach allgemeinen Richtlinien⁷, Herstellerangaben und Erfahrungswerten.

Die Kapitalkosten sind über die Investitionen und die mittlere, technische Lebensdauer der jeweiligen Variante berechnet.

Primärenergie und CO₂-Äquivalentz beschreiben die Unterschiede in dem Entscheidungskriterium Ökologie.

8.1 Grundlagen der Wirtschaftlichkeits- und Ökologieberechnung

Kapitalzinssatz	2.25	%
Elektroenergiepreis	0.138	CHF/kWh
Grundpreis Strom pro kW	86.4	CHF/kW*a
CO ₂ Emissionen Strom*	0.102	T CO ₂ / MWh (CH-Verbrauchermix)
Primärenergie gesamt Strom*	2.52	kWh oil-eq (CH-Verbrauchermix)

* gemäss KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016

Tabelle 11, Grundlagen der Wirtschaftlichkeits- und Ökologieberechnung

8.2 Investitionen ± 25 %

Für die bedeutendsten Anlageteile der Investitionen-Schätzung sind Richtpreis-Offerten bei Lieferanten angefragt worden. Alle weiteren Investitionen sind Erfahrungswerte aus realen Projekten. Entsprechen die vorliegenden Erfahrungswerte nicht den geforderten Dimensionen, wurden die Investitionen mit der folgenden Formel skaliert:

$$K2 = a + K1 \cdot \left(\frac{Q2}{Q1}\right)^{0.71}$$

- a: Fixe Kosten (CHF)
- K1: Nominale Kosten (CHF)
- K2: Kosten effektiv (CHF)
- Q2: Vergleichswert (m³/h, kW, CHF/m², etc.)
- Q1: Nominaler Vergleichswert (m³/h, kW, CHF/m², etc.)

Die Honorare sind mit 20% der Bausumme berücksichtigt.

⁷ VDI-Richtlinie 2067, September 2000; Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung

Folgend sind die Investitionen für die entsprechenden Varianten in Sparten aufgeteilt dargestellt. Diese sind auf den Perimeter abgestimmt und mit Richtofferten sowie Vergleichsprojekten von e+p erstellt.

Aufgrund der Kostengenaugigkeit von $\pm 25\%$ ist hier zu betonen, dass sich alle Varianten auf dem gleichen Investitionsniveau befinden. Von dieser Überlegung losgelöst, ist die Variante 2-Leiter in den Investitionen die günstigste, was hauptsächlich mit dem Wegfall von 2 Fernleitungen zu begründen ist. Die Variante Anergie ist die teuerste Variante. Dies, weil in den Unterstationen Wärmepumpen mit HFO notwendig sind. Diese Unterstationen mit HFO erzwingen Investitionen bei der Belüftung und Sicherheitseinrichtungen.

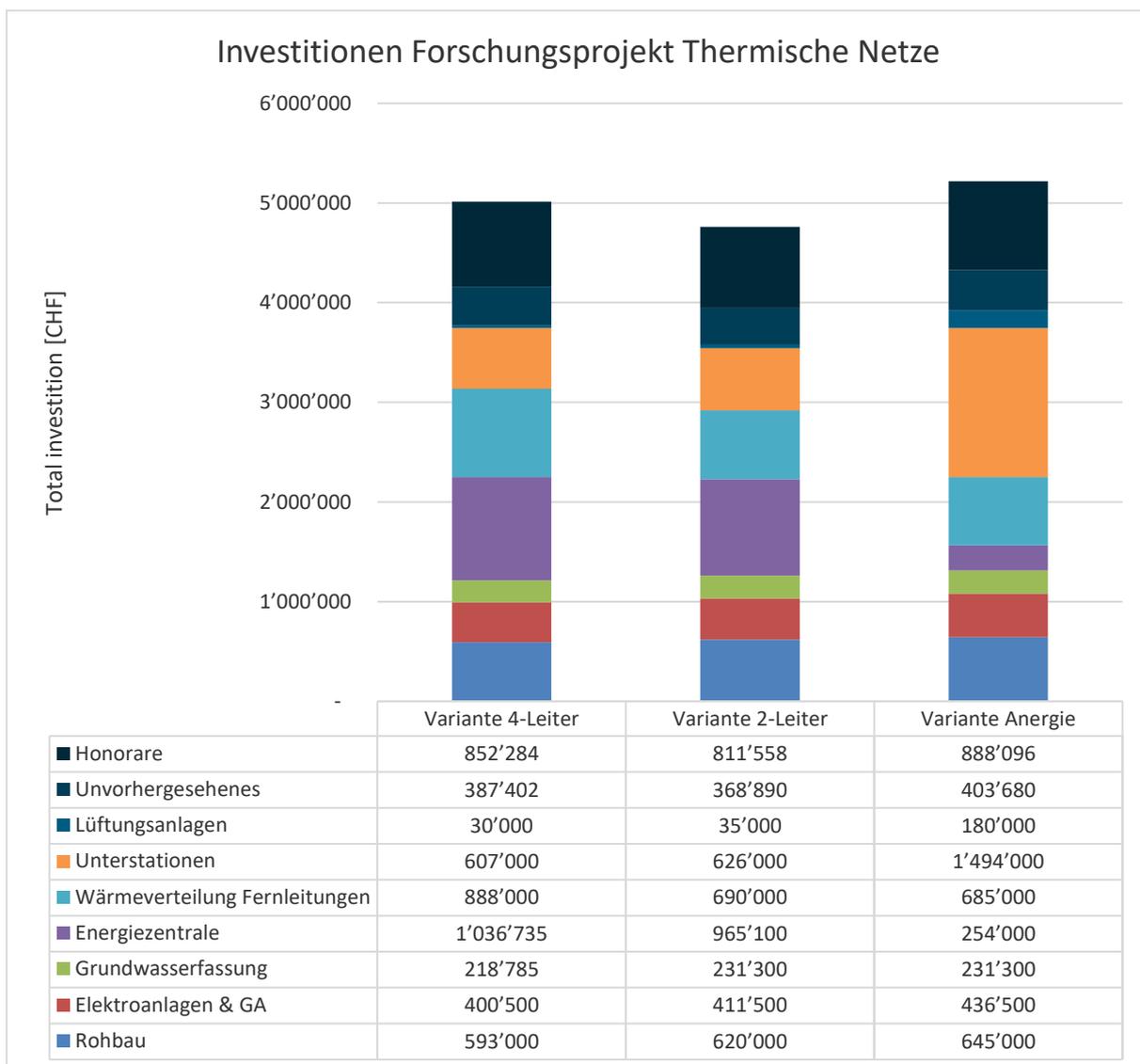


Abbildung 11, Investitionen

Der Rohbau bezieht sich auf die Energiezentralen. Die Variante Anergie hat aufgrund von diversen kleinen Energiezentralen einen höheren Platzbedarf als eine grosse Energiezentrale.

8.3 Nutzungsdauer

Die Abschätzung der Nutzungsdauer basiert auf Erfahrungswerten und Normen⁸. Die Varianten haben aufgrund der unterschiedlichen Anlagenkomponenten eine unterschiedliche Nutzungsdauer. In den Energiezentralen z.B. werden industrielle Wärmepumpen mit einer Nutzungsdauer von ca. 30 Jahren eingesetzt, demgegenüber stehen die dezentralen Wärmepumpen, mit einer Nutzungsdauer von ca. 20 Jahren. Diese Unterschiede sind in der Berechnung berücksichtigt.

	4-Leiter	2-Leiter	Anergie
Durchschnittliche Nutzungsdauer der Anlagekomponenten in Jahren	35	34	32

8.4 Wartungs- und Instandsetzungskosten

Die Abschätzung eines prozentualen Faktors auf die Investitionen erfolgt nach Richtlinien⁹, Herstellerangaben und Erfahrungswerten.

8.5 Jahreskosten

An dieser Stelle muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass es sich um eine Vergleichsstudie zwischen Systemen handelt und nicht um eine Studie zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Grundwasser-Wärmeverbunden.

Folgend sind die Jahreskosten in einem Säulendiagramm dargestellt. In diesem Vergleich ist die Variante 2-Leiter die wirtschaftlichste Variante.

⁸ VDI-Richtlinie 2067, September 2000; Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen

⁹ VDI-Richtlinie 2067, September 2000; Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen

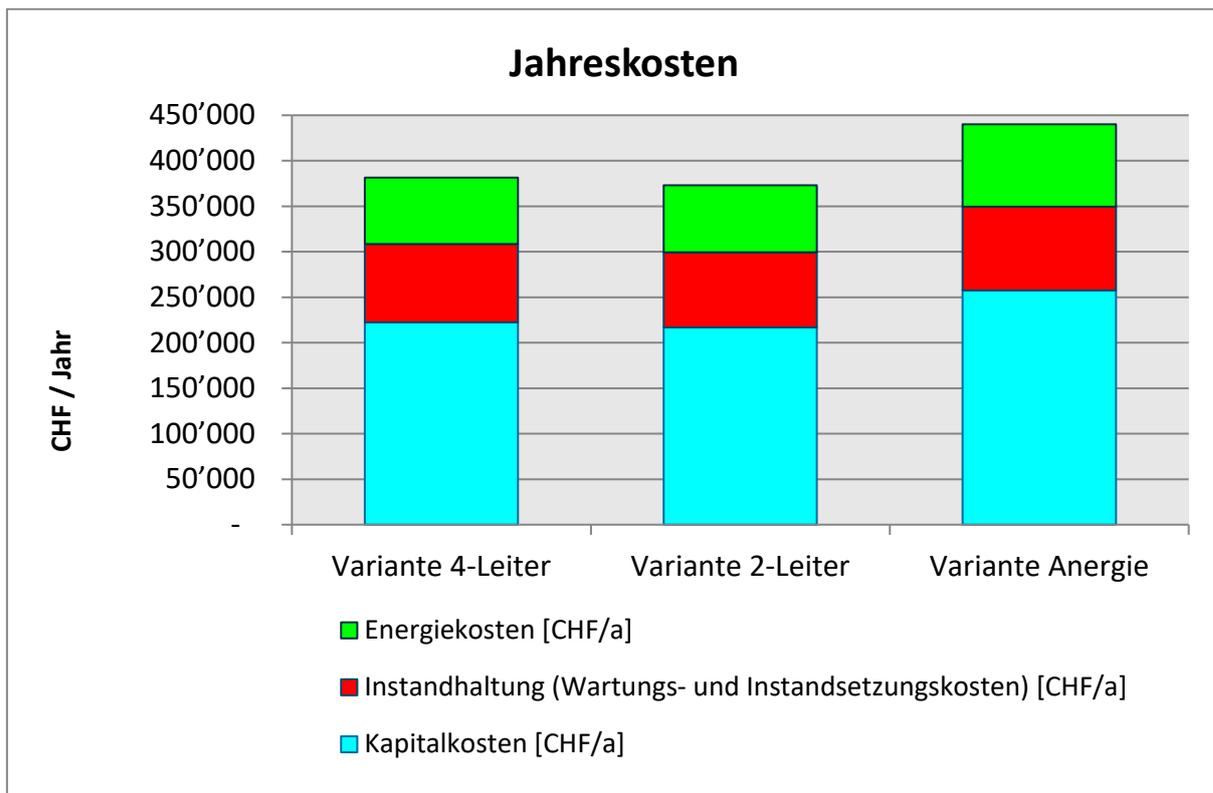


Abbildung 12, Jahreskosten

Die Variante Energie hat aufgrund der hohen Investition und kürzeren durchschnittlichen Lebensdauer auch die höchsten Kapitalkosten.

Der Unterhalt diverser kleiner Energiezentralen ist in etwa gleich aufwendig wie der Unterhalt für eine grosse einzelne Energiezentrale die den gesamten Perimeter abdeckt.

Die Energiekosten sind in der Energie-Variante aufgrund der besseren thermischen Eigenschaften von NH3 zu HFO am höchsten.

8.6 Gesteherungspreise

Der Gesteherungspreis zeigt den Zusammenhang zwischen den Jahreskosten und dem Wärme- & Kälteenergiebedarf. Die Gesteherungspreise sollen als Vergleichswert zwischen den Varianten betrachtet werden.

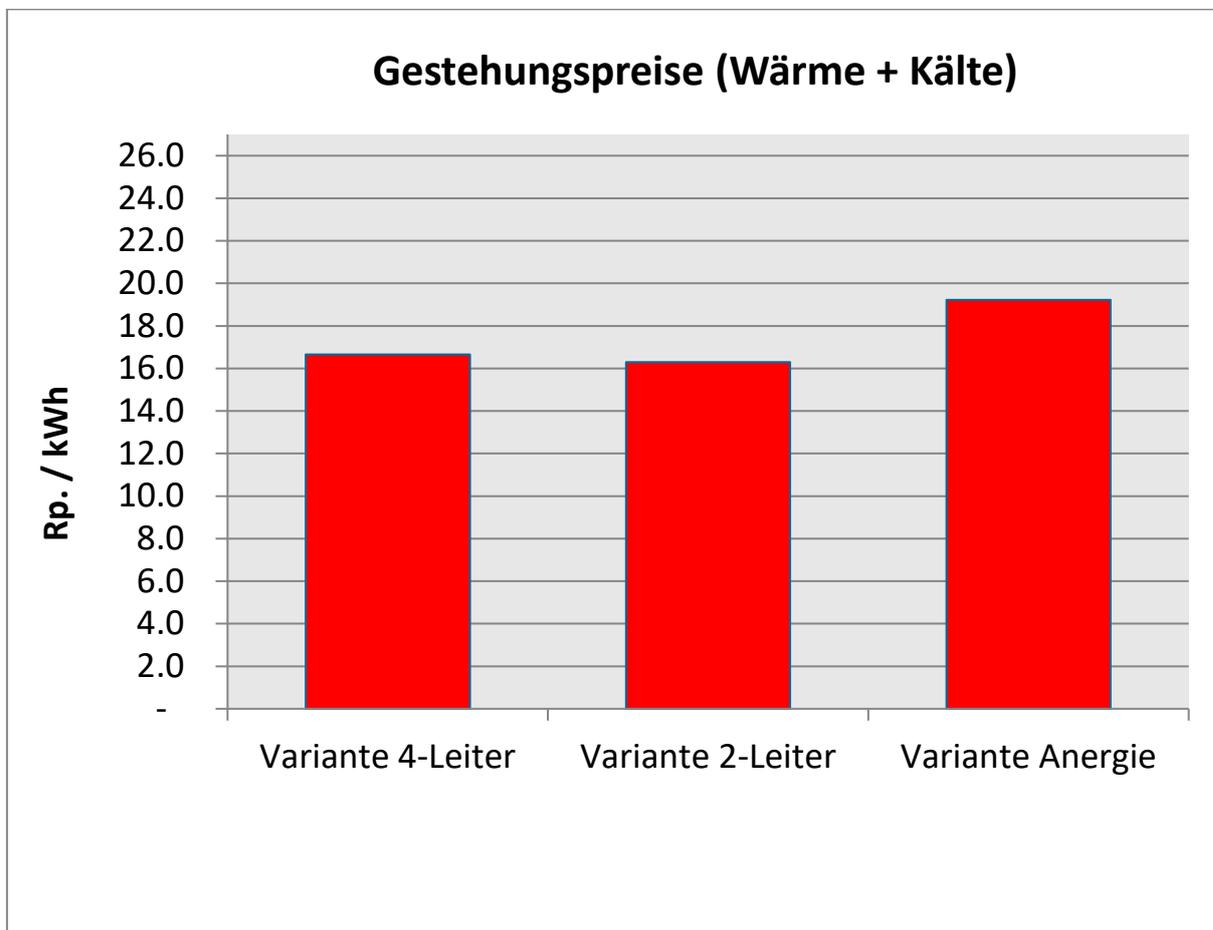


Abbildung 13, Gesteherungspreise

Die Gesteherungspreise sind insbesondere durch den Verkauf der Kälte im wirtschaftlichen Bereich.

8.7 Ökologie

Die ökologische Verträglichkeit ist mittels Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalenz) und Primärenergiebedarf beurteilt. Die zugrundeliegenden Faktoren sind den Ökobilanzen im Baubereich¹⁰ entnommen.

Die ökologischen Unterschiede sind aufgrund des Verzichts auf fossile Energieträger marginal. Die Anergie-Variante hat aufgrund des HFO Kältemittels schlechtere thermische Eigenschaften gegenüber Ammoniak und damit den höheren Strombedarf was sich im höheren CO₂ Äquivalent ausdrückt.

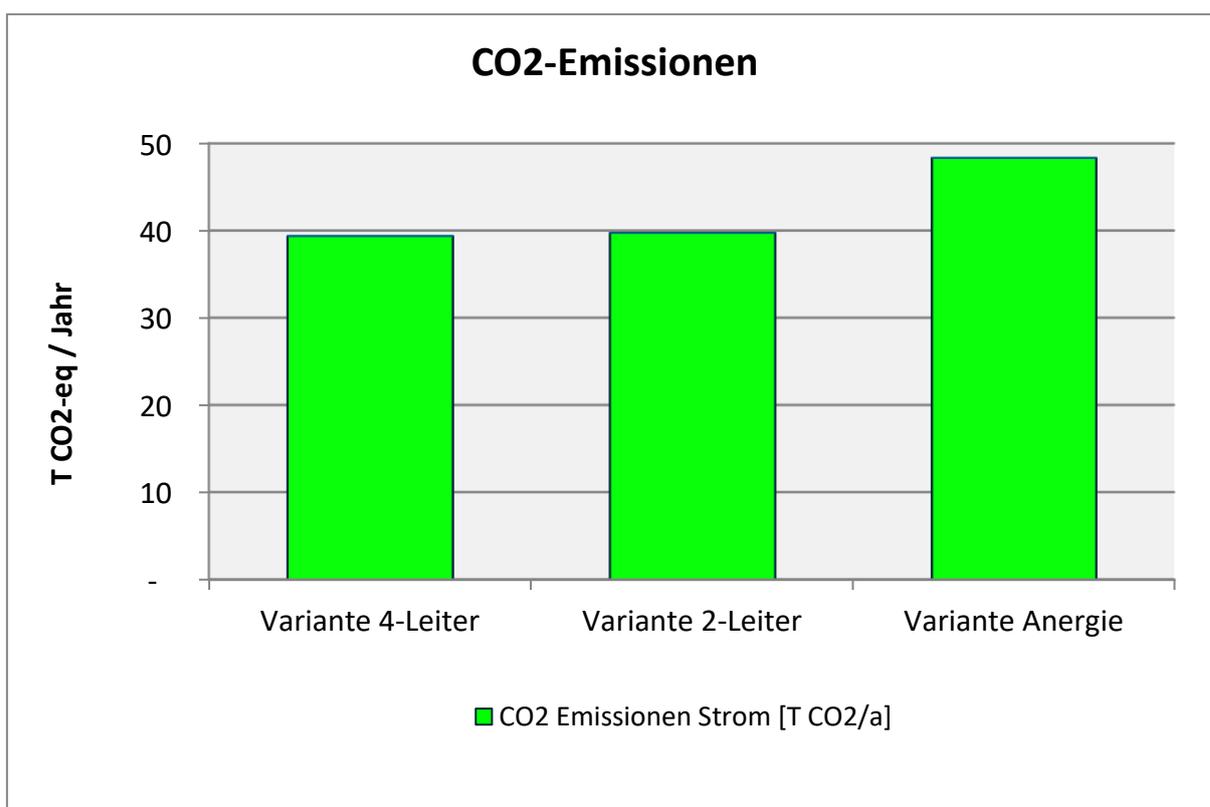


Abbildung 14, CO₂- Emissionen

Da die Emissionen nur vom Stromverbrauch abhängen, ändert sich die Aussage in der Betrachtung der Primärenergie nicht. Die Primärenergie wird daher nicht weiter betrachtet.

¹⁰ KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016

9 Fazit

Das Klima wird wärmer und die Häuser werden besser wärmedämmte, dies verringert die Wärmedichte und damit die Wirtschaftlichkeit von Wärmeverbunden.

Die Gestehungspreise aller Varianten liegen trotz voller Deckung der Wärmeleistung mit Wärmepumpen zwischen 16.3-19.2 Rp./kWh. Diese Zahlen liegen in einem Bereich der Wirtschaftlichkeit, was hauptsächlich auf den Verkauf der Kälte zurückzuführen ist. Dies ist als Chance zu betrachten.

Die Methode der Energie- und Leistungsberechnung mittels SIA 2024 ist praktisch, da es eine Koppelung zwischen Wärme und Kälte in frühen Phasen zulässt. Allerdings besteht ein Verhältnis zwischen Wärme- und Wärmeleistungsbedarf, das in der Praxis wiederlegt wird.

Die lineare Energiedichte ist gegenüber dem gängigen Grenzwert für die Wirtschaftlichkeit bei reinen Wärmeverbunden von 2 MWh/Trm/Jahr mit 4.72 MWh/Jahr sehr hoch, was auf den Verkauf der Kälte zurückzuführen ist. Diese erhöhte lineare Wärmedichte ist nötig, wenn die volle Leistung mittels Wärmepumpen abgedeckt und trotzdem wirtschaftlich sein soll. In dem beschriebenen Perimeter sind die Bandlasten sehr gering. In anderen Wärmeverbunden gibt es ggf. mehr Warmwasserbedarf, was die Wirtschaftlichkeit steigern kann.

Die Variante 2-Leiter (Change-Over System) wird eingesetzt, da ein klarer Umschaltzeitpunkt im Bedarfsprofil des Perimeters vorhanden ist. Sollte der Warmwasserbedarf höher sein, kann dieses System aufgrund der Gleichzeitigkeit von Wärme und Kälte nur bedingt eingesetzt werden.

Die Varianten 4-Leiter und Anergie lassen sich auch bei hoher Gleichzeitigkeit umsetzen.

Insbesondere auffällig sind die hohen Investitionen in die Unterstationen in der Variante Anergie, was mit der Wahl des Kältemittels HFO zusammenhängt. Zudem kommt der Faktor der Gleichzeitigkeit hinzu, welcher bei dezentral installierten Wärmepumpen nicht zum Tragen kommt. Die Investition für die zu erbringende Leistung ist dadurch teurer als bei zentralen Systemen. Mit zunehmender Grösse eines Wärmeverbundes (mehr Wärmekunden) nimmt dieser Effekt aufgrund der geringeren Gleichzeitigkeit zu.

Die Art der Energieabdeckung setzt sich in den Varianten unterschiedlich zusammen:

Energieabdeckung	4-Leiter		2-Leiter		Anergie	
Wärmepumpe NH3	1'384	87%	1'384	87%	0	0%
Wärmepumpe HFO	0	0%	0	0%	1'384	87%
TW-Wassererwärmer (direkt-elektrisch)	199	13%	199	13%	199	13%

Tabelle 12, Energieabdeckung Wärme Werte in MWh/Jahr

Im 2-Leiter-System wird die PK im Winter von dezentralen Kältemaschinen übernommen.

Energieabdeckung	4-Leiter		2-Leiter		Anergie	
GW-Freecooling	706	100%	606	86%	706	100%
Kältemaschine PK	0	0%	100	14%	0	0%

Tabelle 13, Energieabdeckung Kälte Werte in MWh/Jahr

Die beiden zentralen Lösungen decken den Bedarf über effiziente Ammoniak-Grosswärmepumpen ab und haben aufgrund der besseren thermischen Eigenschaften von NH₃ zu HFO, einen tieferen Stromverbrauch.

Die Variante 2-Leiter hat einen leicht höheren Energieverbrauch, da im Winter die PK mittels dezentraler Kältemaschinen abgedeckt wird.

Energieträger	4-Leiter	2-Leiter	Anergie	
Strom	386	389	474	[MWh/a]

Tabelle 14, Energieträger Varianten

Die Ökologie spiegelt direkt den Energiebedarf der Wärmeerzeuger wider, da alle Wärmeerzeuger den gleichen Energieträger (Strom) verwenden. Der CO₂-Ausstoss und der Primärenergiebedarf für die Variante 4-Leiter ist deshalb am tiefsten, gefolgt von den Varianten 2-Leiter und Anergie. Alle Varianten sind jedoch nahe beieinander. Die Variante Anergie hat einen höheren Stromverbrauch, da die dezentralen Wärmepumpen einen schlechteren COP aufweisen. Graue Energie und Umweltbelastungspunkte wurden nicht berücksichtigt.

Die Jahreskosten setzen sich erstens aus den Kapital- und Instandhaltungskosten zusammen, welche auf den Investitionen basieren und zweitens aus den Energiekosten, welche auf dem Energieverbrauch basieren. Auf Grund dieser Grundlagen entscheidet sich die Wirtschaftlichkeit.

Rang	Variante	Jahreskosten [CHF/a]	Relative Abweichung
1	2-Leiter	372'885.00	0%
2	4-Leiter	381'384.00	2%
3	Anergie	415'441.00	11%

Tabelle 15, Ranking Varianten

Die Variante 2-Leiter ist am günstigsten, jedoch ist die Variante 4-Leiter nahezu gleich auf und flexibler im Ausbau des Netzes mit Liegenschaften anderer Nutzungen. Die Variante ist deutlich teurer und geht in Ökologie und Wirtschaftlichkeit als letzte hervor.

Diese Ergebnisse gelten für das hier beschriebene Beispiel. Es empfiehlt sich, bei Projekten im Rahmen der Konzeptphase entsprechende Studien auszulösen, um individuell für ein Projekt die richtige Lösung zu erhalten.

10 Ausblick

Folgende weiterführende Fragestellungen haben sich aus der Bearbeitung ergeben:

- Risikoanalyse;
Analyse des Risikos beim Ausfall eines Wärmeerzeugers bei den unterschiedlichen Varianten.
- Andere Wärmequellen;
Überprüfen der Ergebnisse mit anderen Wärmequellen für die Wärme- und Kälteerzeugung.
- Überarbeiten erste Phase aufgrund aktualisierter ChemRRV 2018
- Sensitivitätsanalyse
- Höhere Anzahl der Wärmekunden und damit Änderung der Gleichzeitigkeit
- Zukünftige Entwicklung Kältemittel mit geringem GWP und ODP im Leistungsbereich 10-350kW
- Andere Nutzung insbesondere Nutzungen mit hohem TWW-Bedarf

11 Anhang

Verzeichnis der Anhänge:

- Anhang [1] Var NH3 WPesti de
- Anhang [2] Var HFO WPesti de

Wärmepumpen-Berechnungsblatt WPEsti

WPEsti / V 8.2.1 / 30.06.2017
gültig bis 31.12.2017

Projekt:

Entscheidungskriterien für die Systemwahl Phase 2, Variante 4-Leiter

Gebäudedaten			
Klimastation			Basel-Binningen
Gebäudekategorie			Verwaltung
Energiebezugsfläche EBF	A_E	m ²	51'340
Heizwärmebedarf nach SIA 380/1	$Q_{h,eff}$	kWh/m ² a	31
Transmissionswärmeverluste nach SIA 380/1	Q_T	kWh/m ² a	ausfüllen ->
Lüftungswärmeverluste nach SIA 380/1	Q_V	kWh/m ² a	ausfüllen ->
Heizung: Zusätzliche Verteilverluste		%	1%
Sperrzeiten für Wärmepumpe		h/d	0
Heizleistungsbedarf ohne Warmwasser bei -7°C	Vorschlagswert:	905.3	kW
Warmwasserbedarf nach SIA 380/1	Q_{ww}	kWh/m ² a	0.0
Warmwasser: Zusätzliche Speicher- und Verteilverluste		%	0%

Wärmepumpen-Anlage	WP-Liste	Hersteller:	Eigene Werte
Name und Typ der Wärmepumpe:		Typ:	w/w
Wärmequelle:		Wasser-Wasser-Wärmepumpe stufenlos	
Einsatz (Heizung oder Warmwasser):		Heizung	
Heizungsspeicher		mit Heizungs - Speicher	
Betriebsweise der Wärmepumpen-Anlage:		monovalenter Betrieb Heizung	
Quellentemperatur (Verdampfer-Eintritt):		°C	
Rechenwerte bei TVL=35°C(Qh/COP):	°C		1'073.0kW / 6.5
Heizleistung Wärmepumpe W10/W35	kW		1073
COP W10W35	-		6.45
Heizleistung Wärmepumpe W10/W55	kW		1092
COP W10W55	-		4.36
Elektrische Leistungsaufnahme Förderpumpe:		W	7900
Quellentemperatur (falls nicht 10°C)		°C	
Solltemperatur wärmster Raum (z.B. Badezimmer)	$T_{i,soll}$	°C	21.5
Vorlauftemperatur der Heizung: (Ta = -8°C)	T VL	°C	39
Rücklauftemperatur der Heizung: (Ta = -8°C)	T RL	°C	28
Differenz Speichertemperatur - Vorlauftemperatur Heizung	dT Speicher	°C	0
Nicht vorhanden			
Solaranlage	Keine Solaranlage		

Resultate			
		0.0%	
Verluste im Heizbetrieb (Anfahren, Speicher, etc.)	4%	Etah =	96%
Verluste im WW-Betrieb (Anfahren, Speicher, etc.)	0%	Etaw =	100%
Laufzeit der Wärmepumpe		h / a	1'626
Anteil und JAZ der Wärmepumpe für die Heizung	$\epsilon =$	100.0%	JAZ_h = 5.20
Anteil und JAZ der Wärmepumpe für Warmwasser			JAZ_{ww} = 0.00
Jahresarbeitszahl Heizung + Warmwasser JAZ _{h+ww} :	exkl. el. Zusatz	-	0.00

Wärmepumpen-Berechnungsblatt WPEsti

WPEsti / V 8.2.1 / 30.06.2017
gültig bis 31.12.2017

Projekt:

Entscheidungskriterien für die Systemwahl Phase 2, Variante Anergie, HFO

Gebäudedaten			
Klimastation			Basel-Binningen
Gebäudekategorie			Verwaltung
Energiebezugsfläche EBF	A_E	m^2	51'340
Heizwärmebedarf nach SIA 380/1	$Q_{h,eff}$	kWh/m2a	31
Transmissionswärmeverluste nach SIA 380/1	ausfüllen ->	Q_T	kWh/m2a
Lüftungswärmeverluste nach SIA 380/1	ausfüllen ->	Q_V	kWh/m2a
Heizung: Zusätzliche Verteilverluste			3%
Sperrzeiten für Wärmepumpe			0
Heizleistungsbedarf ohne Warmwasser bei -7°C	Vorschlagswert:	923.2	kW
Warmwasserbedarf nach SIA 380/1	Q_{ww}	kWh/m2a	0.0
Warmwasser: Zusätzliche Speicher- und Verteilverluste			0%

Wärmepumpen-Anlage	WP-Liste		Hersteller:	Eigene Werte
Name und Typ der Wärmepumpe:			Typ:	W/W
Wärmequelle:			Wasser-Wasser-Wärmepumpe stufenlos	
Einsatz (Heizung oder Warmwasser):			Heizung	
Heizungsspeicher			mit Heizungs - Speicher	
Betriebsweise der Wärmepumpen-Anlage:			monovalenter Betrieb Heizung	
Quellentemperatur (Verdampfer-Eintritt):			°C	
Rechenwerte bei TVL=35°C(Qh/COP):	°C			1'073.0kW / 5.8
Heizleistung Wärmepumpe W10/W35	kW			1073
COP W10W35	-			5.8
Heizleistung Wärmepumpe W10/W55	kW			1092
COP W10W55	-			2.6
Elektrische Leistungsaufnahme Förderpumpe:			W	15000
Quellentemperatur (falls nicht 10°C)			°C	10
Solltemperatur wärmster Raum (z.B. Badezimmer)		$T_{i,soll}$	°C	21.5
Vorlauftemperatur der Heizung: (Ta = -8°C)		T VL	°C	39
Rücklauftemperatur der Heizung: (Ta = -8°C)		T RL	°C	28
Differenz Speichertemperatur - Vorlauftemperatur Heizung		dT Speicher	°C	0
Nicht vorhanden				

Solaranlage	Keine Solaranlage		

Resultate			
		0.0%	
Verluste im Heizbetrieb (Anfahren, Speicher, etc.)	4%	$\epsilon_{ta} =$	96%
Verluste im WW-Betrieb (Anfahren, Speicher, etc.)	0%	$\epsilon_{taw} =$	100%
Laufzeit der Wärmepumpe		h / a	1'658
Anteil und JAZ der Wärmepumpe für die Heizung	$\epsilon =$	100.0%	$JAZ_h =$ 4.67
Anteil und JAZ der Wärmepumpe für Warmwasser			$JAZ_{ww} =$ 0.00
Jahresarbeitszahl Heizung + Warmwasser JAZh+ww:	exkl. el. Zusatz	-	0.00