Energieverbund Zug Machbarkeitsstudie

Technischer Bericht Anergienetz und wissenschaftliche Begleitung

Auftraggeber: Stadt Zug
Kanton Zug

Bearbeitungs-Team: Matthias Sulzer, Hochschule Luzern, Technik & Architektur
Diego Hangartner, Hochschule Luzern, Technik & Architektur

Erstelldatum: 17.04.2014

Revidiert:

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **3**

Tabellenverzeichnis **3**

1. Zusammenfassung **4**

2. Einleitung **6**

2.1 Ziel und Zweck 6
2.2 Grundlagen 6
2.3 Abkürzungen 6
2.4 Freigabe und Aktualisierung 6

3. Technische Machbarkeit **7**

3.1 1-Leiter Systeme 7
3.2 2-Leiter Systeme 7
3.3 3-Leiter Systeme 7
3.4 4-Leiter Systeme 8
3.5 Vergleich Technische Eigenschaften 8
3.6 Vergleich Wirtschaftlichkeit 9
3.7 Gerichtete und ungerichtete Netze 12
3.8 Redundanz / Sicherheit Anergienetz 13

4. Schnittstellen **13**

5. Referenzendokumente **14**

6. Anhang **15**

6.1 Berechnungen der Eigenschaften des 1-Leiter Systems 15
6.2 Berechnungen der Eigenschaften des 2-Leiter Systems 16
6.3 Berechnungen der Eigenschaften des 3-Leiter Systems 17
6.4 Berechnungen der Eigenschaften des 4-Leiter Systems 18
6.5 Wirtschaftlichkeitsberechnung 2-Leiter System vs. 3-Leiter System 19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nutzungszonen der Etappe 1 mit Seewasserfassungen (duchgezogene Linien), Grundwasserbohrungen (Punkte) und Entwässerungskanal (gestichelte Linie). 4

Abbildung 2: Darstellung des 2-Leiter Systems für die Etappe 1. 7

Abbildung 3: Ausgleich der Einsparungen der Jahreskosten im Vergleich zu den Investitionen bei 33% Anteil Deckung des Heizwärmebedarfs über den Drittleiter nach 30 Jahren. 10

Abbildung 4: Ausgleich der Einsparungen der Jahreskosten im Vergleich zu den Investitionen bei 33% Anteil Deckung des Heizwärmebedarfs über den Drittleiter und 50% Anteil Deckung des Kältebedarfs über den Vierleiter nach 30 Jahren..... 11

Abbildung 5: gerichtetes Netz, alle Pumpen ziehen Wärme vom gleichen Leiter. 12

Abbildung 6: ungerichtetes Netz, die Förderpumpen ziehen Wärme oder Kälte vom wärmsten bzw. kältesten Leiter. 12

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusätzliche Grundlagen 6

Tabelle 2: Abkürzungen..... 6

Tabelle 3: Technische Eigenschaften der vier Systeme..... 8

Tabelle 4: Wirtschaftlichkeitsberechnung der vier Systeme. 9

Tabelle 5: Jährliche Gesamtkosten, unterteilt in Kapital-, Unterhalts-, und Energiekosten..... 10

Tabelle 6: Referenzen 14

1. Zusammenfassung

Im Auftrag der Stadt und des Kantons Zug erstellt die Firma Hans Abicht AG eine Machbarkeitsstudie für einen Energieverbund auf tiefem Temperaturniveau mit Nutzung von Seewasser und Grundwasser zur Wärme-und Kälteversorgung der Stadt Zug. Die Versorgung erfolgt in verschiedenen Etappen. Das Zentrum für integrale Gebäudetechnik (ZIG) an der Hochschule Luzern (HSLU) bringt sich als wissenschaftliche Begleitung in diesem Projekt ein und unterstützt durch fundiertes Wissen und Erfahrungen aus anderen Projekten die wichtigsten Entscheidungen.

Zwei zentrale Punkte wurden in diesem Projekt vom ZIG abgeklärt. Die Frage nach der Anzahl Leiter, die der Energieverbund für die Etappe 1 (siehe Abbildung 1) haben soll und ob das Netz gerichtet oder ungerichtet betrieben sein soll.

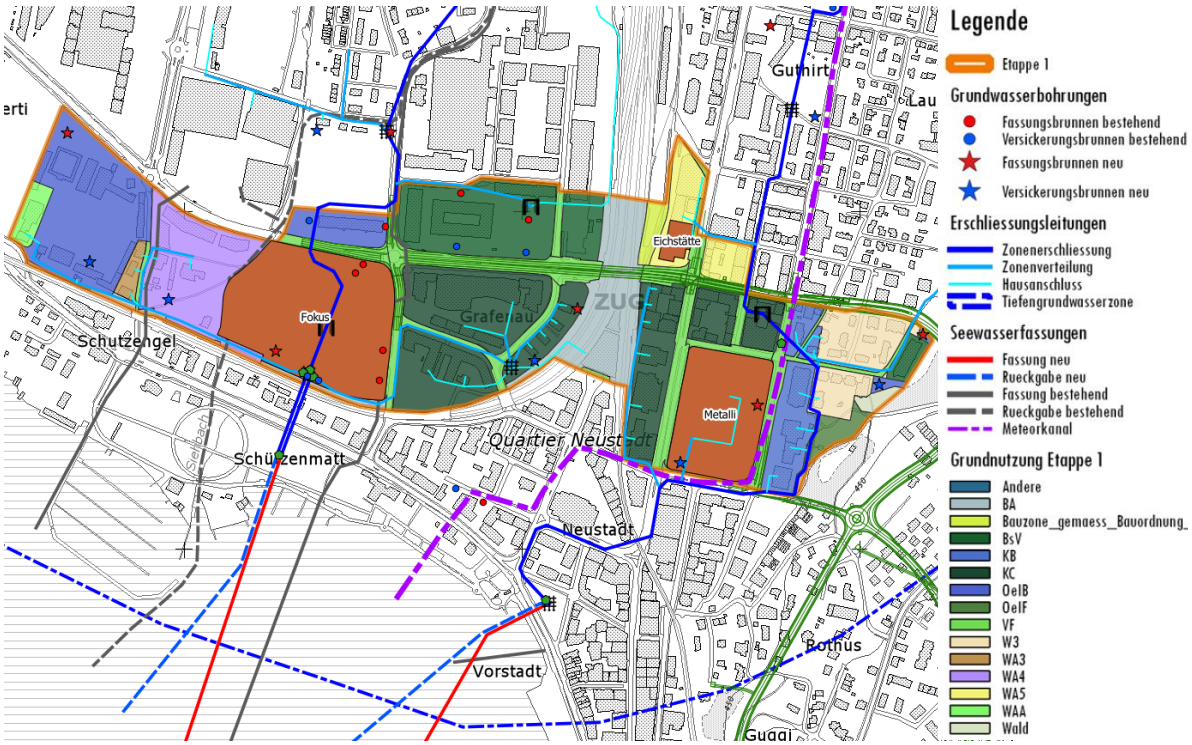


Abbildung 1: Nutzungszonen der Etappe 1 mit Seewasserfassungen (duchgezogene Linien), Grundwasserbohrungen (Punkte) und Entwässerungskanal (gestichelte Linie).

Die Untersuchungen des ZIG haben gezeigt, dass ein 2-Leiter System aus energetischen und wirtschaftlichen Gründen gegenüber einem 3-Leiter und 4-Leiter System vorzuziehen ist. Unter Umständen ist die Einbindung eines 1-Leiter Systems denkbar, insbesondere entlang der Industriestrasse bis zum See über das Quartier Neustadt, wo ein Entwässerungskanal in Planung steht.

Ungerichtete Netze erzielen einen höheren exergetischen Wirkungsgrad als gerichtete Netze, da im ungerichteten Netz höhere Temperaturspreizung zwischen den beiden Leitern erreicht wird. Bei voller Auslastung müssen aber im ungerichteten Netz die dezentralen Förderpumpen die hohen Druckverluste überwinden. Die verhältnismässig kleineren am Netz angeschlossenen Wärmepumpen müssen folglich eine beträchtliche Druckerhöhung bei kleinstem Durchfluss herstellen. Solche Förderpumpen sind technisch aufwändig und hydraulisch schwierig einzubinden. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass das Netz gerichtet zu betreiben ist, d.h. alle Wärmepumpen, Kältemaschinen und Free-Cooling-Wärmetauscher beziehen ihre Energie aus demselben Leiter.

Für die erste Etappe wird über die Nutzung von Grundwasser und Seewasser (+Niedertemperaturhubwärmepumpe) sichergestellt, dass das Areal vollständig mit Wärme und Kälte versorgt wird. Alle anderen Wärmequellen (Wärmekraftkoppelung, Abwärme, usw.), die ans Anergienetz angeschlossen werden, werden als Redundanz zum nötigen Zeitpunkt eingesetzt, um die Laufzeit der Niedertemperaturhubwärmepumpe zu kürzen. Welche Technologien

zur Deckung der Spitzenlasten bzw. Aufwärmung des Anergienetzes eingesetzt werden, steht noch offen und wird Teil einer späteren Prüfung sein.

2. Einleitung

2.1 Ziel und Zweck

Der Zweck der wissenschaftlichen Begleitung war die Unterstützung der Machbarkeitsstudie mittels Analyse, Modellrechnungen und Wissensaustausch zu leisten. Folgende Punkte wurden für den künftigen Energieverbund in Zug geprüft:

- Anzahl Leiter des Energieverbunds
- Hydraulisches Konzept (gerichtetes / ungerichtetes Netz)

Der Fokus in dieser Aufgabenstellung lag auf der Etappe 1. Die Resultate aus dieser Studie können jedoch für die nachfolgenden Etappen genutzt werden.

2.2 Grundlagen

Die verwendeten Grundlagen sind im Projekthandbuch [1] und im Übergeordneten Bericht [2] beschrieben. Zusätzlich verwendete Grundlagen sind:

Dokument	Version
Trendanalyse Energieverbrauch	Version 6, 26.11.2013
Definition Energie und Leistung	Version 1, 10.12.2013

Tabelle 1: Zusätzliche Grundlagen

2.3 Abkürzungen

Die verwendeten Abkürzungen sind im Projekthandbuch [1] beschrieben. Zusätzliche in diesem Dokument verwendete Abkürzungen sind in der folgenden Tabelle beschrieben.

Abkürzung	Bedeutung
JAZ	Jahresarbeitszahl ist gleich dem Wärmeertrag durch den Stromeintrag der Wärmepumpen (inkl. Umwälzpumpen)

Tabelle 2: Abkürzungen

2.4 Freigabe und Aktualisierung

Für den Inhalt und die Aktualisierung ist das Bearbeitungsteam verantwortlich. Die Freigabe von Aktualisierungen erfolgt durch die Gesamtleitung.

3. Technische Machbarkeit

3.1 1-Leiter Systeme

Ein 1-Leiter System besteht ausschliesslich aus einem Vorlauf. Der Rücklauf wird in ein anderes Medium wie z.B. ein Regenwasserkanal zurückgeführt (offenes System). Dadurch können die Kosten für den Graben oder, in dichtbesiedelten Gebieten, die Kosten für Microtunneling für den Rücklaufleiter eingespart werden. Das System hat jedoch folgende Nachteile; es gibt keine Rückführung von Abwärme, d.h. die Abwärme aus einem Gebäude kann nicht für ein anderes Gebäude genutzt werden. Ausserdem müssen die Rücklauftemperaturen dem Rückgabemedium (Grundwasser, Biotop, usw.) entsprechend eingehalten werden. Somit ist die Temperaturnutzung zu Heiz-und Kühlzwecke eingeschränkt. Für die Strecke vom See über das Quartier Neustadt entlang der Industriestrasse wird noch abgeklärt, ob der Rücklauf über den geplanten Regenwasserkanal geführt und ob ein 1-Leiter System statt 2-Leiter System umgesetzt werden kann.

3.2 2-Leiter Systeme

Die meisten Energieverbunde, oder sogenannte „Anergienetze“, bestehen aus 2 Leitern, d.h. aus einem Vor- und Rücklauf (geschlossenes System). Das Anergienetz wird durch Grundwasser und Seewasser über einen Wärmetauscher gespiesen. Die Temperaturen schwanken im Vorlauf zwischen 12°C und 18°C und im Rücklauf zwischen 6°C und 12 °C. Die Energie aus der Temperaturdifferenz von 6 Kelvin wird durch Wärmepumpen oder Kältemaschinen auf dem gewünschten Temperaturniveau bereitgestellt, oder über Free-Cooling direkt genutzt. In Abbildung 2 wird das 2-Leiter System für die Etappe 1 dargestellt.

2-Leiter System

Etappe 1	Wärme	Kälte
Nutzenergiebedarf	16.8 MWh/m*a	9’450 MWh/m*a
Volllaststunden	1’700 h/a	800 h/a
Leistungsbedarf	9.9 kW/m	9.8 kW/m

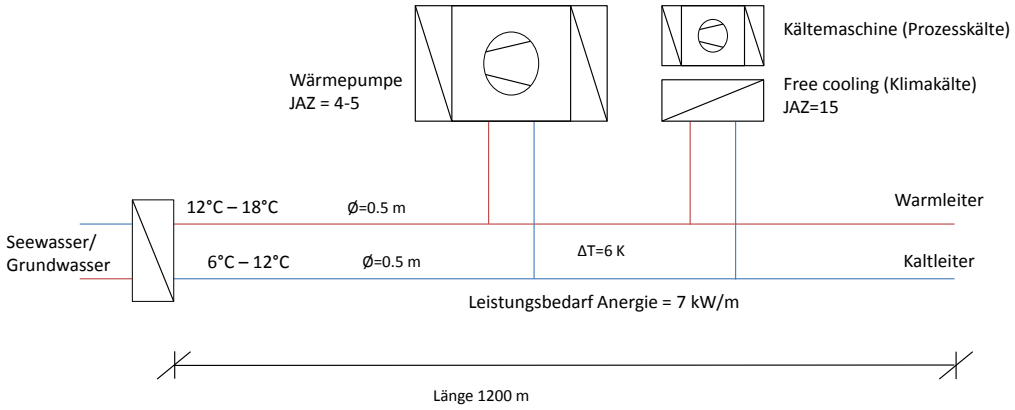


Abbildung 2: Darstellung des 2-Leiter Systems für die Etappe 1.

3.3 3-Leiter Systeme

Ein 3-Leiter System verfügt über einen zusätzlichen Leiter auf unterschiedlichem Temperaturniveau, beispielsweise über 30°C. Falls ein Abnehmer wie eine Bodenheizung auf diesem Temperaturniveau vorhanden ist, kann diese Wärme direkt über einen Wärmetauscher ohne Einsatz einer Wärmepumpe genutzt werden. Gemäss den Untersuchungen lässt sich ein 3-Leiter System gegenüber einem 2-Leiter System nur dann wirtschaftlich rechtfertigen, wenn mindestens 30% des Heizwärmebedarfs des Versorgungsgebiets über dem Drittleiter versorgt werden kann. Auf der Versorgungsseite wäre eine Abwärmequelle über 35°C mit entsprechender Ergiebigkeit ebenfalls notwendig.

3.4 4-Leiter Systeme

Das 4-Leiter System wird sinnvoll einsetzbar, wenn Quellen mit überwiegender Abwärme (>35°C) bzw. Kälte (<8°C) auf dem Areal vorhanden sind, mit deren direkt geheizt bzw. gekühlt werden kann. Wirtschaftlich lohnt es sich selten, da die hohen Leitungskosten die Einsparungen in den Hausinstallationen nicht kompensieren.

3.5 Vergleich Technische Eigenschaften

Die Eigenschaften der 1-2-3-4 Leiter Systeme wurden in folgender Tabelle zusammengefasst. Anhand des Nutzenergiebedarfs Wärme/Kälte, der Trasselängen des Areals in der Etappe 1, der Volllaststunden Wärme/Kälte und der entsprechenden Jahresarbeitszahlen wurden der Leistungsbedarf Anergie, Strom und der Durchmesser der Rohre gerechnet. Der Anteil Deckung Wärme/Kälte vom Dritt/Viert-Leiter wurde iterativ aus der Wirtschaftlichkeitsberechnung ermittelt, so dass über eine Betrachtungsperiode von 30 Jahre, die erhöhten Investitionen durch den Nutzen des zusätzlichen Leiters möglichst kompensiert werden konnten.

		[Einheit]	1-Leiter	2-Leiter	3-Leiter	4-Leiter
①	Nutzenergiebedarf Wärme/Kälte	[MWh/a]	**20‘107/ 9‘451**			
②	Trasselänge Etappe 1	[m]	**1200**			
③	Spezifischer Nutzenergiebedarf Wärme/Kälte	[MWh/m*a]	**16.8/ 7.9**			
④	Volllaststunden Wärme/Kälte	[h/a]	**1‘700/ 800**			
⑤	Leistungsbedarf Wärme/Kälte	[kW/m]	**9.9/ 9.8**			
⑥	Jahresarbeitszahl Wärme/Kälte	[-]	**4/8**	**4/15**	**4/15**	**4/15**
⑦	Anteil Deckung Wärme/Kälte vom Dritt/Viert-Leiter	[%]	**-/-**	**-/-**	**33/-**	**33/50**
⑧	Leistungsbedarf Anergie Wärme/Kälte (2-Leiter)	[kW/m]	**7.4/8.6**	**7.4/9.15**	**4.95/9.15**	**4.95/4.57**
⑨	Leistungsbedarf Strom Wärme/Kälte	[kW/m]	**2.5/1.2**	**2.5/0.65**	**1.65/0.65**	**1.65/0.33**
⑩	Temperaturnutzung	[K]	**4**	**6**	**6**	**6**
⑪	Durchmesser Rohr -- Erst/Zweit/Dritt/Viert-Leiter	[m]	**0.6/-/-/-**	**0.5/0.5/-/-**	**0.4/0.4/0.35/-**	**0.4/0.4/0.35/0.7**

Tabelle 3: Technische Eigenschaften der vier Systeme.

① *Werte aus dem Dokument „Definition Energie und Leistung“.*
② *Wert aus dem Grundlagendokument.*
③ *Berechnet aus ① und ②.*
④ *Werte aus dem Dokument „Definition Energie und Leistung“.*
⑤ *Berechnet aus ③ und ④.*
⑥ *Annahmen. JAZ Kälte des 1-Leiter Systems tiefer, da Temperaturnutzung zum Kühlen beschränkt ist.*
⑦ *Iteration aus der technische Eigenschaften der Systeme und aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse.*
⑧ *Berechnet aus ⑤, ⑥ und ⑦.*
⑨ *Berechnet aus ⑤, ⑥ und ⑦.*
⑩ *Annahmen. Temperaturnutzung beim 1-Leiter System tiefer da die Rückgabe in ein anderes Medium erfolgt.*
⑪ *Berechnet aus ②, ⑧ und ⑩ mit Annahme der Wassergeschwindigkeit im Energieverbund 2 m/s.*

Die technischen Eigenschaften der Systeme diente als Basis für die Wirtschaftlichkeitsberechnung.

3.6 Vergleich Wirtschaftlichkeit

Für die Beurteilung der benötigten Anzahl Leiter wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Jährliche Kapital-, Unterhalts- und Energiekosten wurden einander für die vier Leitersysteme gegenübergestellt.

			1-Leiter	2-Leiter	3-Leiter	4-Leiter
①	Investitionen (Leitungsnetz + Wärme und Kälteerzeugung, Diverses/Honorare)	[CHF/m]	**8'800**	**11'000**	**15'400**	**17'600**
②	Zinssatz	[%]	**3**			
③	Betrachtungsperiode	[a]	**30**			
④	Jährliche Kapitalkosten	[CHF/m*a]	**450**	**560**	**785**	**900**
⑤	Unterhaltskosten /Unterhaltskostensteigerung	[%]	**1/1**			
⑥	Jährliche Unterhaltskosten	[CHF/m*a]	**80**	**100**	**140**	**160**
⑦	Spezifischer Nutzenergiebedarf Wärme/Kälte	[MWh/m*a]	**16.8/ 7.9**			
⑧	Anteil Deckung vom Dritt/Viert-Leiter	[%]	**-/-**	**-/-**	**33/-**	**33/50**
⑨	Spezifischer Nutzenergiebedarf Wärme/Kälte (2-Leiter)	[MWh/m*a]	**16.8/7.9**	**16.8/7.9**	**11.2/7.9**	**11.2/3.9**
⑩	Jahresarbeitszahl Wärme/Kälte	[-]	**4/8**	**4/15**	**4/15**	**4/15**
⑪	Endenergiebedarf Strom Wärme/Kälte	[MWh/m*a]	**4.2/1**	**4.5/0.53**	**2.8/0.53**	**2.8/0.26**
⑫	Strompreis	[CHF/kWh]	**0.15**	**0.15**	**0.15**	**0.15**
⑬	Energiepreissteigerung	[%]	**1.5**			
⑭	Jährliche Energiekosten	[CHF/m*a]	**780**	**710**	**500**	**460**

Tabelle 4: Wirtschaftlichkeitsberechnung der vier Systeme.

① *Annahmen aus Erfahrungsprojekte.*
② *Wert aus dem Grundlagendokument.*
③ *Wert aus dem Grundlagendokument.*
④ *Gibt die konstante Zahlung der Annuität der Periode zurück gemäss:*
Annuität=Investitionen(Zinssatz*(1+Zinssatz)^Periode)/((1+Zinssatz)^Periode – 1)*
⑤ *Werte aus dem Grundlagendokument.*
⑥ *Entspricht den Investitionen (exkl. Diverses/Honorare)*Unterhaltskosten.*
⑦ *Werte aus Tabelle 3.*
⑧ *Werte aus Tabelle 3.*
⑨ *Werte aus Tabelle 3.*
⑩ *Werte aus Tabelle 3.*
⑪ *Berechnet aus ⑨ und ⑩.*
⑫ *Annahme.*
⑬ *Wert aus Grundlagendokument.*
⑭ *Berechnet aus ⑪ und ⑫.*

Für die Berechnung der jährlichen Gesamtkosten der vier Systeme wurde den Mittelwertfaktor bestimmt, damit die Unterhaltskostensteigerung und Energiepreissteigerung berücksichtigt

werden. Der Mittelwertfaktor entspricht den Unterhaltskosten bzw. Energiekosten über die Gesamtbetrachtungsperiode geteilt durch die entsprechende Betrachtungsperiode. Die durchschnittlichen jährlichen Kosten werden berechnet, indem die Unterhaltskosten bzw. Energiekosten des ersten Jahrs mit dem Mittelwertfaktor multipliziert werden.

		1-Leiter	2-Leiter	3-Leiter	4-Leiter
Mittelwertfaktor Kapitalkosten	1	**450**	**560**	**790**	**900**
Mittelwertfaktor Unterhaltskosten	1.15	**90**	**110**	**160**	**180**
Mittelwertfaktor Energiekosten	1.23	**950**	**870**	**610**	**570**
Total	[CHF/m*a]	**1490**	**1540**	**1560**	**1650**

Tabelle 5: Jährliche Gesamtkosten, unterteilt in Kapital-, Unterhalts-, und Energiekosten.

Das 1-Leiter-System zeigt sich als kostengünstigste Lösung, ist aber aus technischen und ökologischen Gründen nicht überall durchführbar. Das 4-Leiter-System stellt aus wirtschaftlichen Gründen die wenigst attraktive Lösung dar, da unter anderem zu wenig Kältebedarf vorhanden ist. Zwischen dem 2-Leiter und dem 3-Leiter System erweisen sich die Kosten über die Nutzungsdauer gleichwertig, falls beim 3-Leiter System mindestens 30% des Heizwärmebedarfs in der Etappe 1 mit dem Drittleiter gedeckt werden kann und eine Abwärmequelle über 35°C mit entsprechender Ergiebigkeit vorhanden ist. Diese Rahmenbedingungen sind in der ersten Etappe nicht gegeben. Deshalb wird der zukünftige Energieverbund in Zug aus 2 Leitern bestehen.

Vergleich 2-3-Leiter (33% Deckungsgrad über den Drittleiter)

Beim 3-Leiter System sind die Investitionen höher als beim 2-Leiter System. Diesen Zusatzaufwand wird über die Jahre durch die Stromeinsparung der Wärmepumpen kompensiert, falls mindestens 30% des Heizwärmebedarfs in der Etappe 1 mit dem Drittleiter gedeckt werden kann.

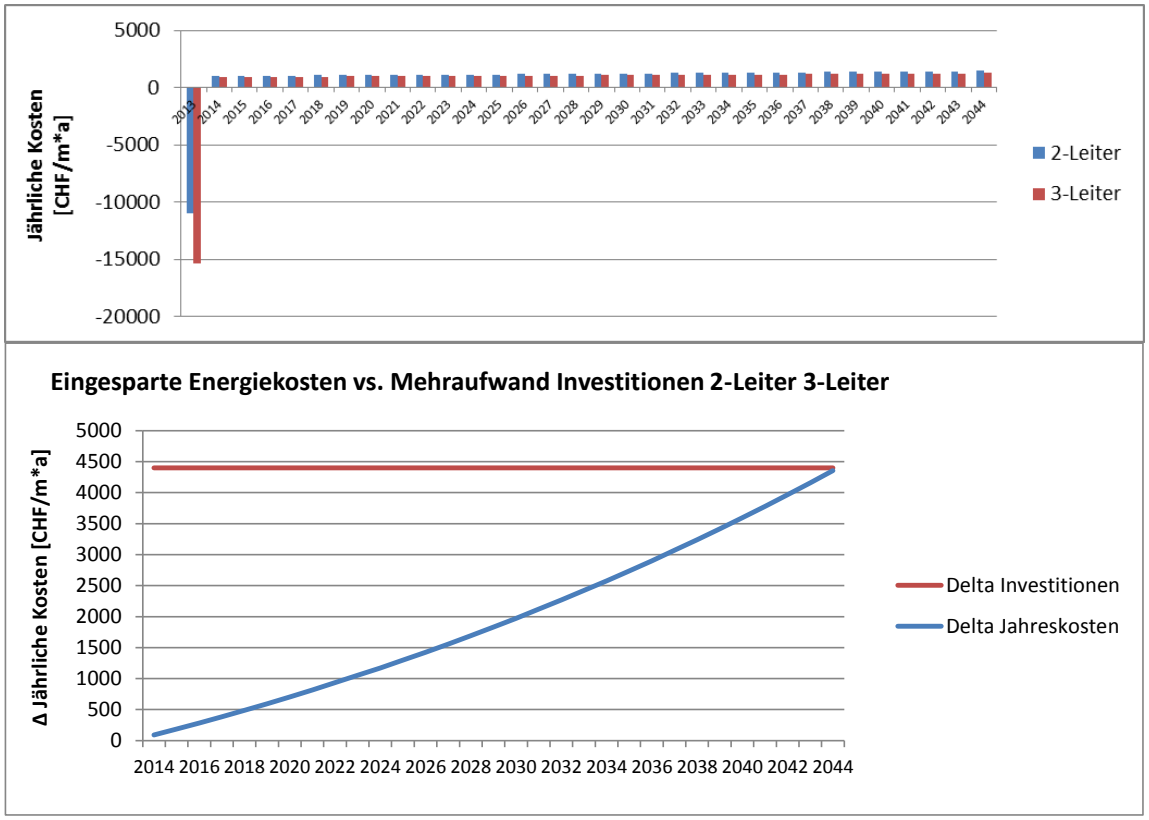


Abbildung 3: Ausgleich der Einsparungen der Jahreskosten im Vergleich zu den Investitionen bei 33% Anteil Deckung des Heizwärmebedarfs über den Drittleiter nach 30 Jahren.

Vergleich 2-4-Leiter (33%/50% Deckungsgrad über den Dritt/Viert-Leiter)

Beim 4-Leiter System sind die Investitionen höher als beim 2-Leiter und 3-Leiter System. Angenommen, dass sich 33% des Heizwärmebedarfs über den 3-Leiter Systems und 50% des Kältebedarfs über den 4-Leiter Systems decken lässt, reichen die eingesparten Kosten über 30 Jahre nicht, um die Mehrinvestitionen zu decken.

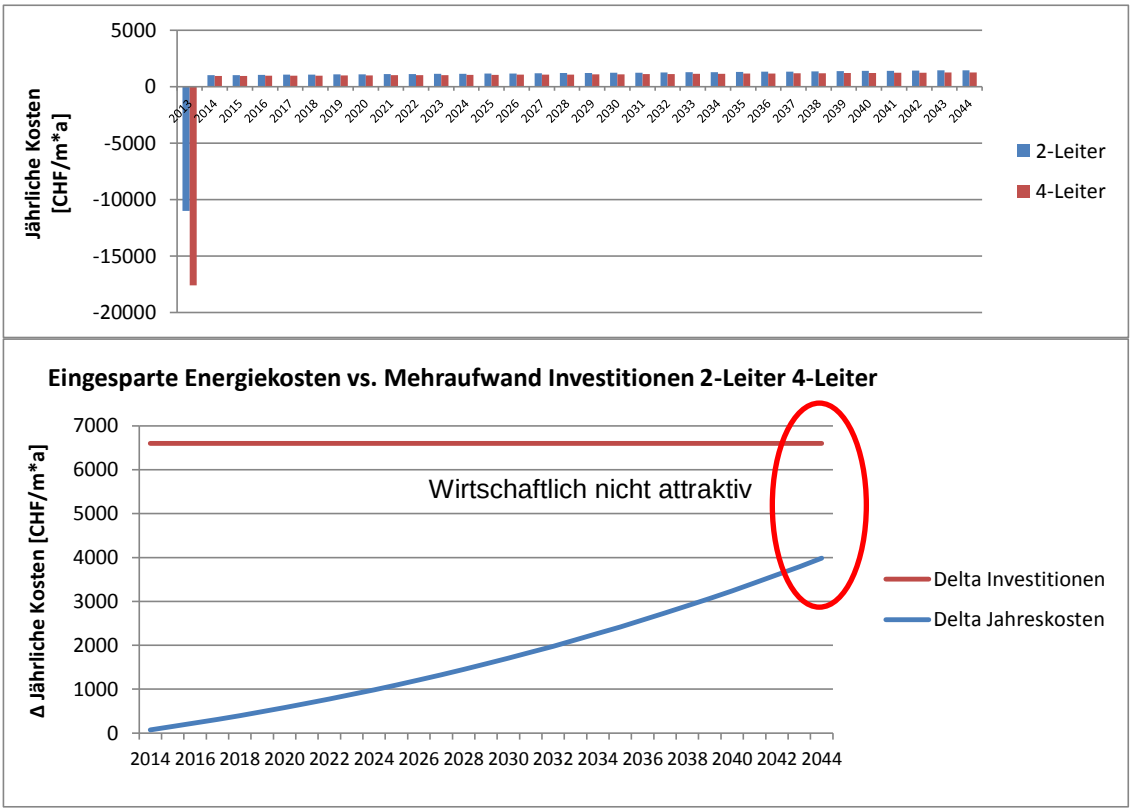


Abbildung 4: Ausgleich der Einsparungen der Jahreskosten im Vergleich zu den Investitionen bei 33% Anteil Deckung des Heizwärmebedarfs über den Drittleiter und 50% Anteil Deckung des Kältebedarfs über den Vierleiter nach 30 Jahren.

3.7 Gerichtete und ungerichtete Netze

Ein gerichtetes Anergienetz ist ein Netz, an dem alle Bezüger (Wärmepumpen, Free-Cooling Wärmetauscher und Kältemaschinen) vom gleichen Leiter Wärme bzw. Kälte beziehen. Die Rückgabe an den zweiten Leiter erfolgt auf unterschiedlichem Temperaturniveau und verursacht einen Beimischungsverlust, welcher für die exergetische Betrachtung in Rechnung getragen werden muss.

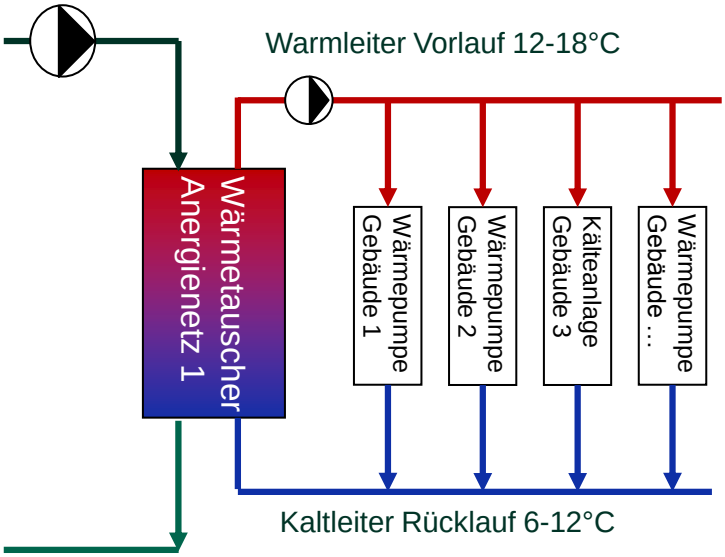


Abbildung 5: gerichtetes Netz, alle Pumpen ziehen Wärme vom gleichen Leiter.

Ein ungerichtetes Anergienetz ist ein Netz, an dem die Bezüger ihre Energie (Wärmepumpen, Free-Cooling Wärmetauscher und Kältemaschinen) vom Warm- bzw. Kaltleiter beziehen. Aus exergetischer Sicht, ist ein ungerichtetes Netz wirkungsvoller als ein gerichtetes Netz, da die Vorlauftemperatur an die Kältemaschine tiefer liegt und die Wärmeabgabe direkt in den Warmleiter erfolgt. Somit können die Synergien zwischen Wärmepumpen und Kältemaschinen optimal genutzt werden. Der signifikanteste Nachteil liegt jedoch im hydraulischen Verhalten des Netzes. Das Wasser wird im Netz bidirektional umgewälzt und es entstehen schnell ändernde Druckverhältnisse im Netz, welche durch die dezentralen, gebäudeeigenen Förderpumpen ausreguliert werden müssen. Förderpumpen von kleineren Wärmepumpen und/oder Kältemaschinen, die am Anergienetz angeschlossen sind, müssen somit in der Lage sein hohe Drücke bei kleinem Volumenstrom bereitzustellen.

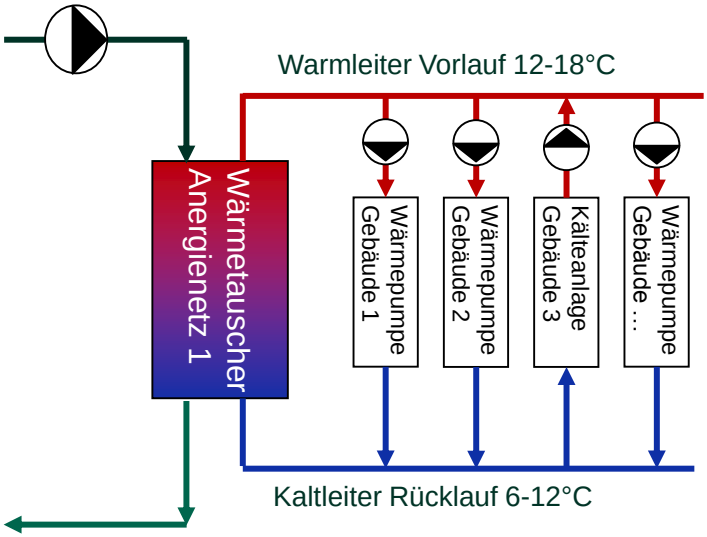


Abbildung 6: ungerichtetes Netz, die Förderpumpen ziehen Wärme oder Kälte vom wärmsten bzw. kältesten Leiter.

Das Gesamtsystem ‚ungerichtetes Netz' erreicht die höhere Energieeffizienz als das System, gerichtetes Netz, kleine Anschlüsse müssen aber einen höheren Beitrag zum Gesamtsystem leisten. Bei vielen unterschiedlichen Eigentümern ist eine faire Verrechnung nur sehr schwierig umzusetzen.

Für den Energieverbund wird dementsprechend ein gerichtetes gegenüber einem ungerichteten Netz vorgezogen.

3.8 Redundanz / Sicherheit Anergienetz

Aufgrund der Berechnungen der Wärmebedarfs und der verfügbaren Wärmequellen, wurde geschätzt, dass die erste Etappe vollständig über die Nutzung von Grundwasser und Seewasser (+Niedertemperaturhubwärmepumpe) sichergestellt werden kann. Die verfügbaren Wärmequellen (Wärmekraftkoppelung, Abwärme, usw.), die ans Anergienetz während Spitzenzeiten angeschlossen werden können, fungieren als Redundanz, um die Laufzeit der Niedertemperaturhubwärmepumpe nach der Seewasserfassung zu kürzen. Welche Technologien zur Deckung der Spitzenlasten bzw. Aufwärmung des Anergienetzes eingesetzt werden, steht noch offen und wird Teil einer späteren Prüfung sein.

4. Schnittstellen

Planungsvorgaben für das Anergienetz (2-Leiter System, gerichtetes Netz):

- Betriebstemperaturen (Zielwerte):
  Vorlauf Winter: >12°C
  Rücklauf Winter: >6° bzw. 8°C (abhängig vom Wärmeentzug der Wärmepumpe)
  Vorlauf Sommer: <16°C
  Rücklauf Sommer: <20°C

- Auslegetemperaturen:
  Wärmepumpen Winter: 8°/4°C
  Free-Cooling Sommer: 16°/20°C

- Hydraulik:
  Druckschwankungen Netz: +/- 15%

- Wärmepumpe:
  Leistungsregulierung 20-100%, Bezug Wassermenge aus Anergienetz variable, abhängig von der Verdampferleistung.

- Kältemaschine:
  Leistungsregulierung 20-100%, Bezug Wassermenge aus Anergienetz variable, abhängig von der Verdampferleistung.

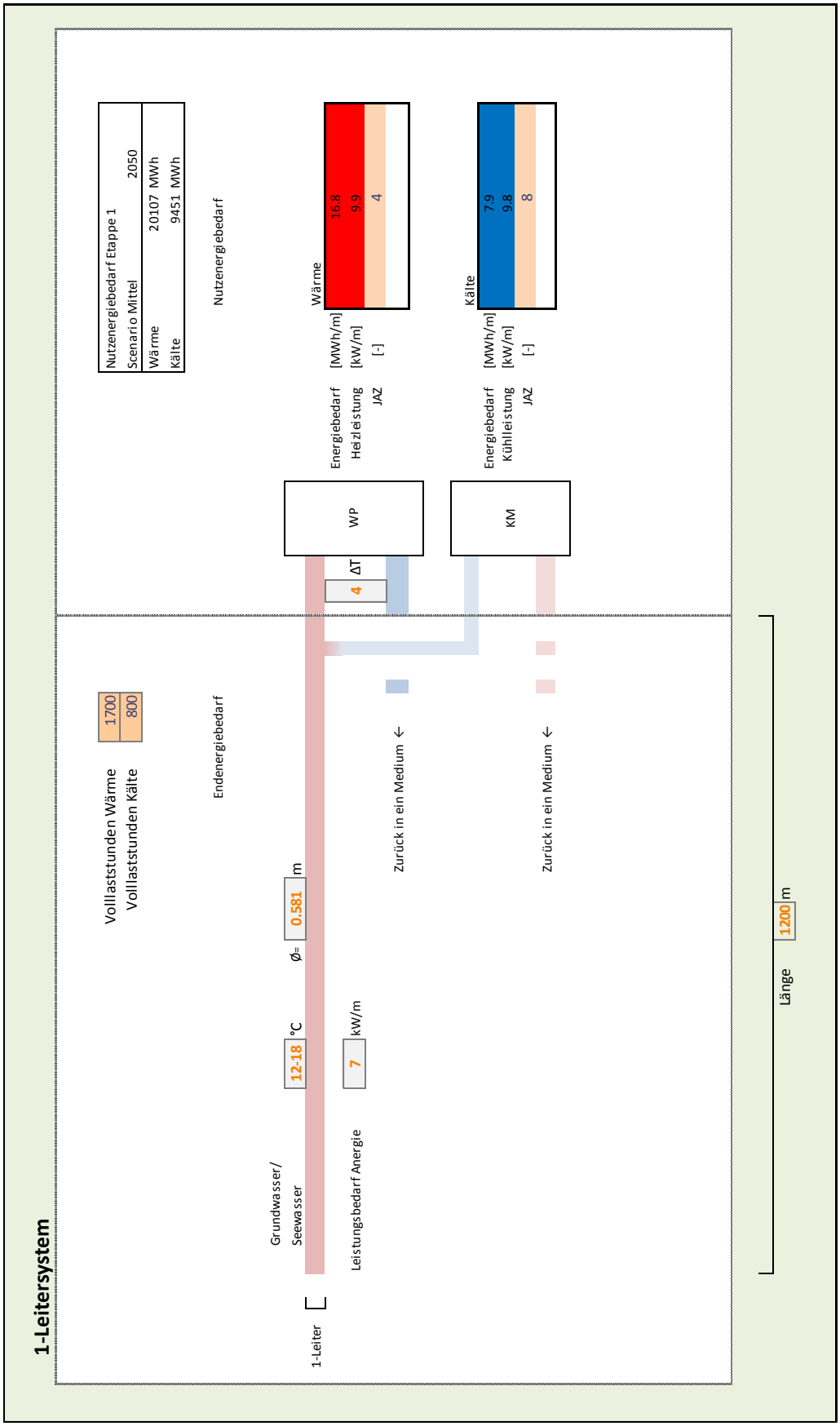
5. Referenzendokumente

[Nr.]	Dokumentenbezeichnung	Version
[1]	Energieverbund Zug Projekthandbuch (Machbarkeitsstudie)	1.0 / 12.August 2013
[2]	Übergeordneter Bericht	

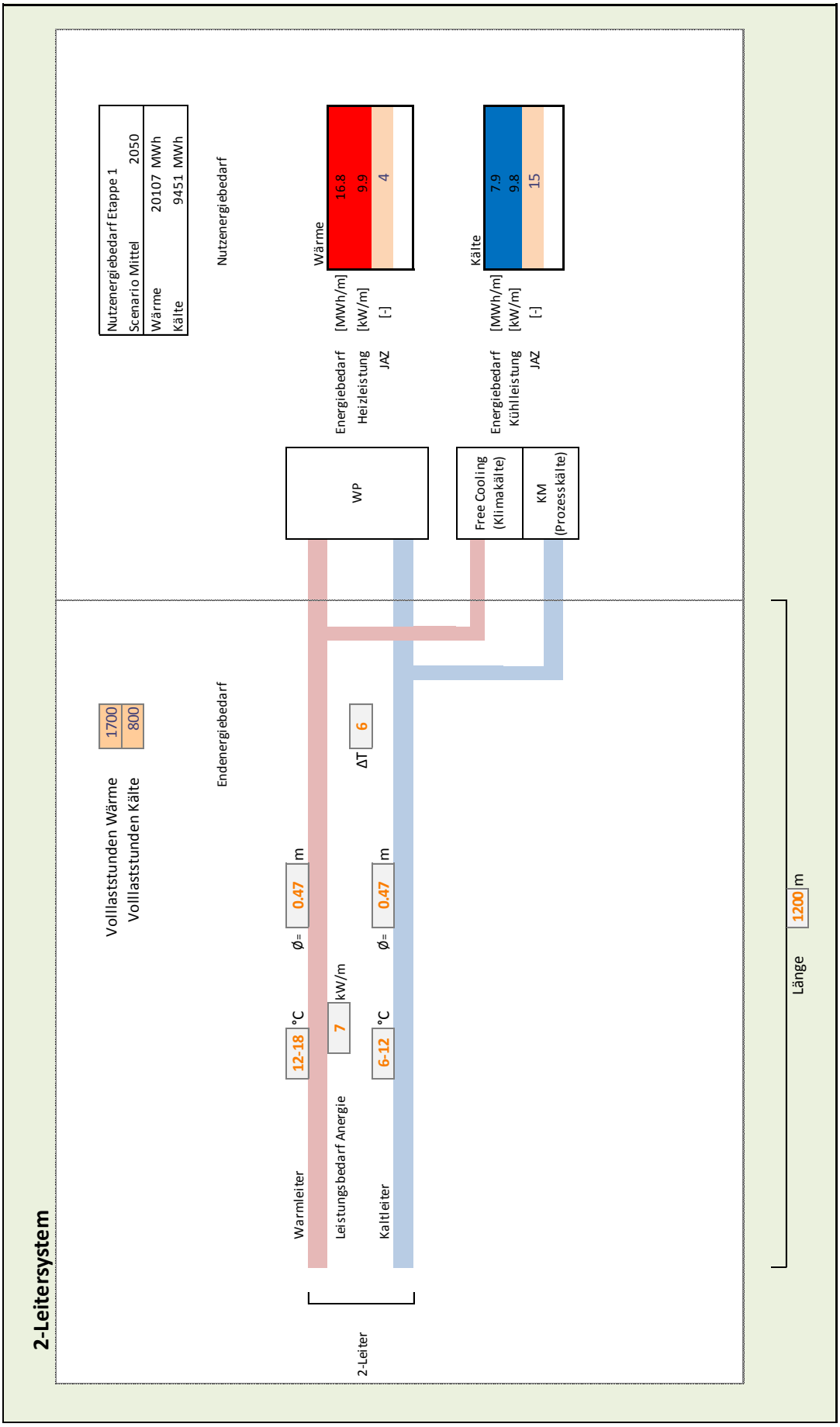
Tabelle 6: Referenzen

6. Anhang

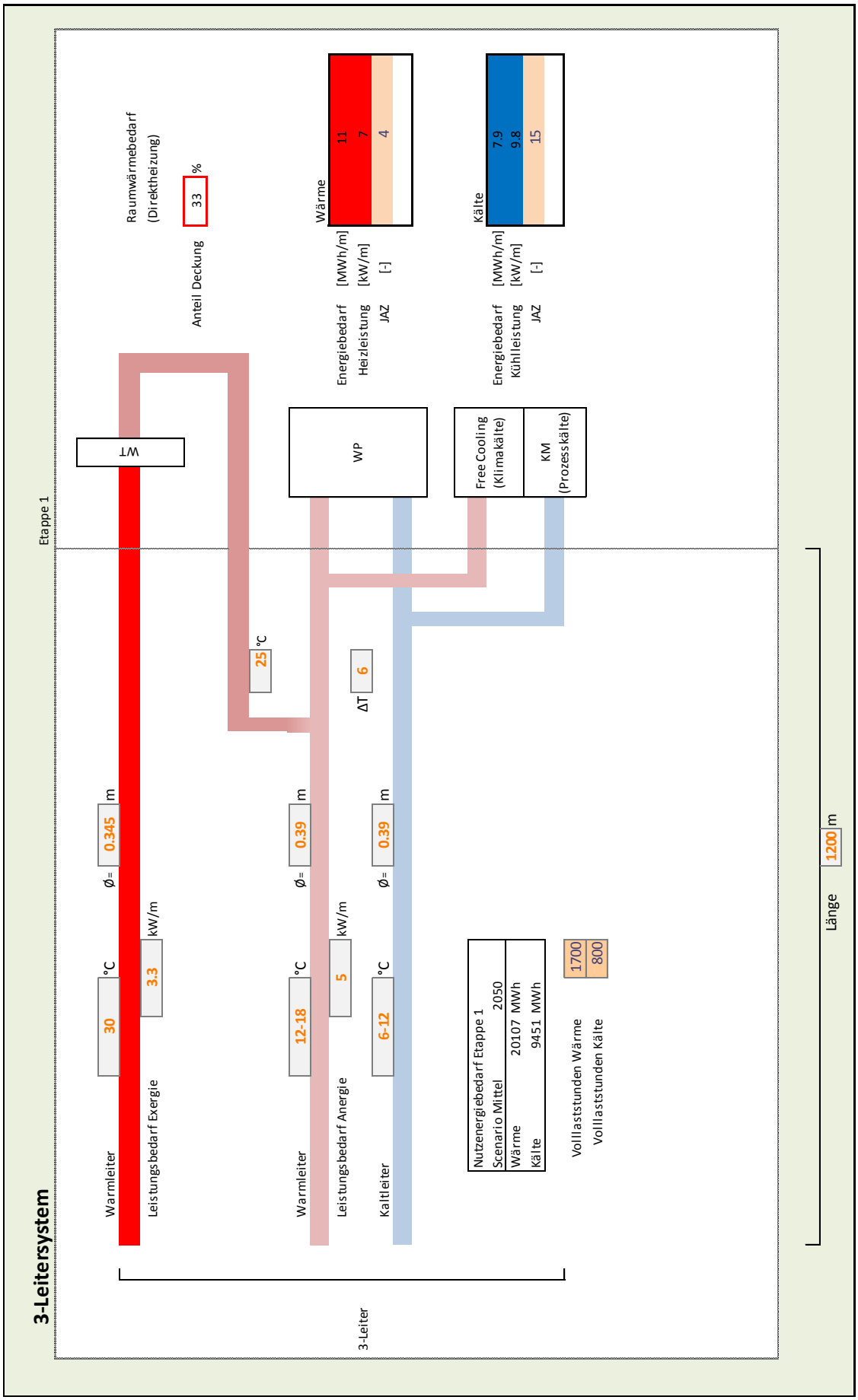
6.1 Berechnungen der Eigenschaften des 1-Leiter Systems



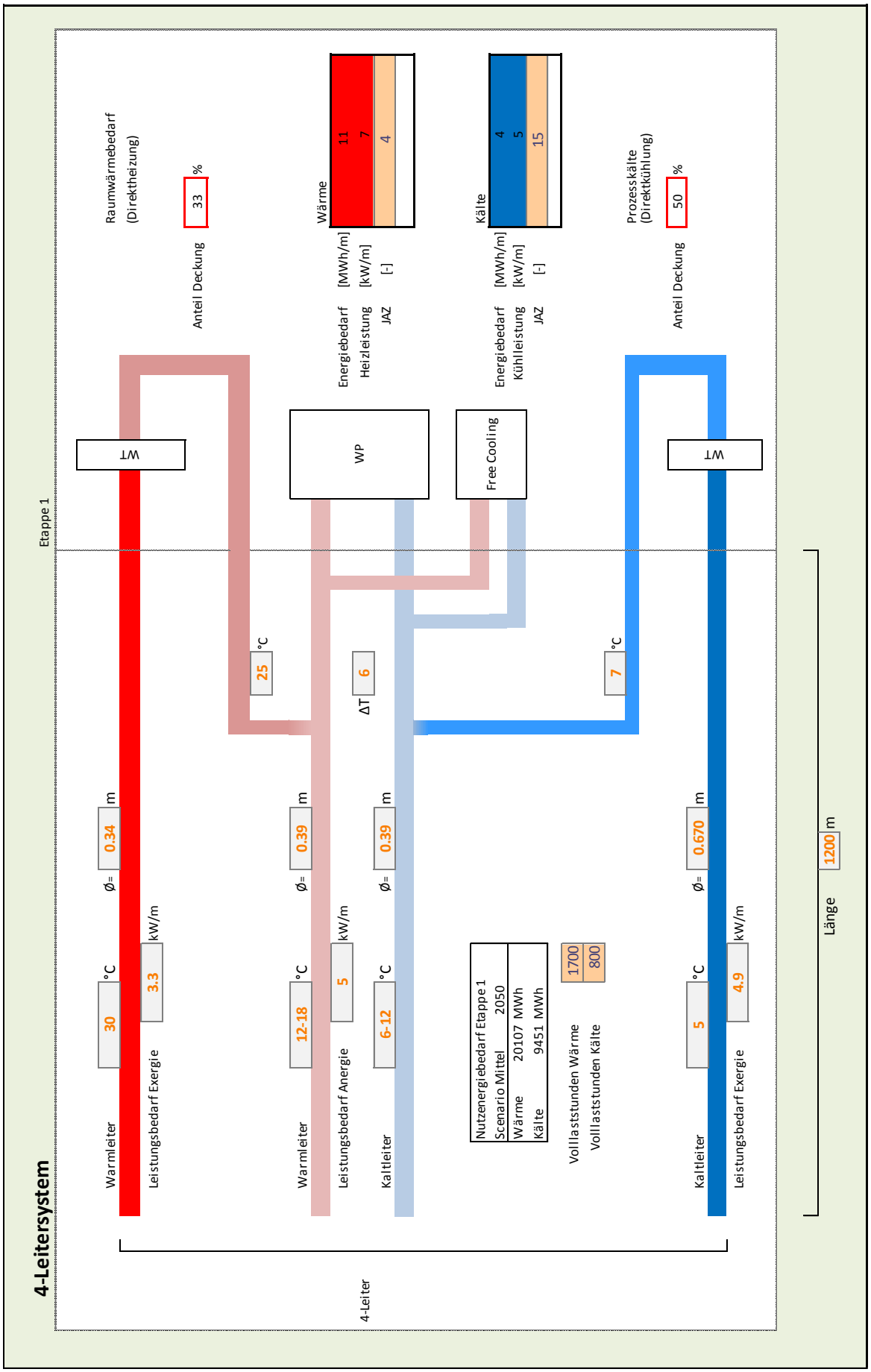
6.2 Berechnungen der Eigenschaften des 2-Leiter Systems



6.3 Berechnungen der Eigenschaften des 3-Leiter Systems



6.4 Berechnungen der Eigenschaften des 4-Leiter Systems



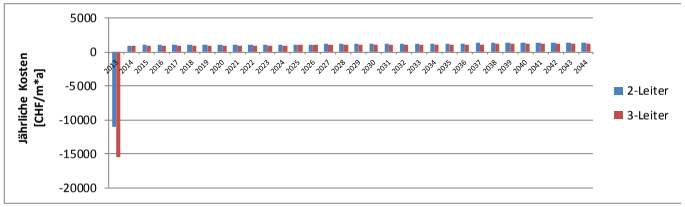
6.5 Wirtschaftlichkeitsberechnung 2-Leiter System vs. 3-Leiter System

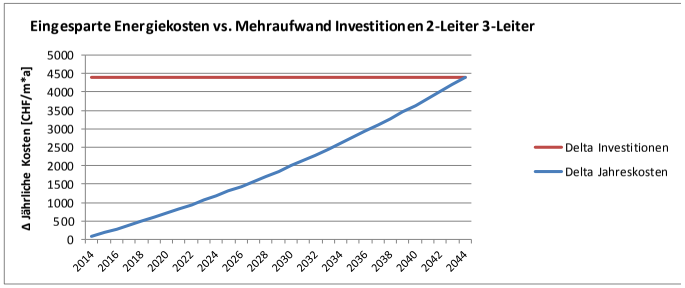
		1-Leiter	2-Leiter	3-Leiter	4-Leiter	Vergleich 2 Varianten		Differenz
Jährliche Kapitalkosten						2-Leiter	3-Leiter	
Länge Rohrleitung	[m]	1	1	1	1	1.0	1.0	
Spez. Preis/Länge	[CHF/m]	800	1000	2000	2500	1000	2000	
Investitionen	[CHF]	8000	10000	14000	16000	10000	14000	
Diverses/Honorare	[%]	10%	10%	10%	10%	10%	10%	
Total	[CHF]	8800	11000	15400	17600	11000	15400	
Lebensdauer Rohr	[a]	50	50	50	50	50	50	
Betrachtungsperiode Zinsatz	[a]	30	30	30	30	30	30	
Zinssatz	[%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%	
Annuitätsfaktor	[a^{-1}]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	
Jährliche Kapitalkosten	[CHF/a]	**449.0**	**561.2**	**785.7**	**897.9**	561.2	785.7	224
Jährliche Unterhaltskosten								
Unterhaltskosten relativ zu Invest.kosten	[%]	1%	1%	1%	1%	1%	1%	
Unterhaltskostensteigerung	[%]	1%	1%	1%	1%	1%	1%	
Jährliche Unterhaltskosten	[CHF/a]	80	100	140	160	100	140	40
	Eingesparte Wärme i.V. zu 2-Leiter [%]			33.2	33.2			
Jährliche Energiekosten	*Eingesparte Kälte i.V. zu 2-Leiter [%]*			0.0	50.0			
Wärmebedarf	[kWh/m a]	16756	16756	11198	11198	16755.8	11197.8	-5558
Kältebedarf	[kWh/m a]	7876	7876	7876	3938	7875.8	7875.8	0
Wirkungsgrad/JAZ Wärmebedarf	[-]	4	4	4	4	4.0	4.0	
Wirkungsgrad/JAZ Kältebedarf	[-]	8	15	15	15	15.0	15.0	
Endenergiebedarf zur Deckung des Wärmebedarfs	[kWh/a]	4189	4189	2799	2799	4189	2799	-1390
Endenergiebedarf zur Deckung des Kältebedarfs	[kWh/a]	984.5	525.1	525.1	262.5	525	525	0
Energiepreis	[CHF/kWh]	0.15	0.15	0.15	0.15	0.2	0.2	
Energiepreissteigerung	[%]	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	
Allgemeine Teuerung	[%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%	
Jährliche Energiekosten	[CHF/a]	**776**	**707**	**499**	**459**	707.1	498.7	-208
Total der mittleren Jährlichen Kosten								
Mittelwertfaktor Kapitalkosten	1.0	449	561	786	898	561.2	785.7	
Mittelwertfaktor Unterhaltskosten	1.1	92	115	160	183	114.6	160.4	
Mittelwertfaktor Energiekosten	1.2	954	869	613	565	869.1	612.9	
Total	[CHF/a]	**1494**	**1545**	**1559**	**1646**	1544.9	1559.0	14
Energieträger		WP	WP	WP	WP	4	4	
Spez. THG-Emissionen	[kg CO_2/kWh]	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	
THG-Emissionen	[kg CO_2/a]	801.9	730.7	515.3	474.6	730.7	515.3	-215

Tabelle Energieträger

	Wirkungsgrad	Energiepreis	THG-Emissionsfaktor	Energiekostensteigerung*
Heizöl	0.85	0.11	0.295	1.50%
Erdgas	0.9	0.15	0.241	1.00%
Holz	0.75	0.08	0.036	0.50%
WP	4	0.15	0.155	1.00%
Fernwärme	0.75	0.08	0.15	1.00%

**Gemäss Grundlagedokument*





Diese Graphik zeigt, dass sich zwischen einem 2-Leiter und 3-Leiter die eingesparten Energiekosten im Vergleich zu dem Mehraufwand der Investitionen ausgleicht, falls mit dem 3-Leitersystem 33.17 % des Nutzenergiebedarfs mit Direktheizung abgedeckt werden kann.

Investitionen Jährliche Kosten ->

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
1-Leiter	-8800	1024	1037	1050	1063	1076	1089	1103	1116	1130	1145	1159	1174	1188	1203	1219	1234
2-Leiter	-11000	1013	1025	1037	1049	1061	1074	1087	1099	1112	1126	1139	1153	1166	1180	1195	1209
3-Leiter	-15400	920	929	938	947	957	966	976	986	996	1006	1016	1026	1037	1048	1058	1069
4-Leiter	-17600	939	948	956	965	974	983	993	1002	1011	1021	1031	1041	1051	1061	1071	1082
2-Leiter	-11000	1013	1025	1037	1049	1061	1074	1087	1099	1112	1126	1139	1153	1166	1180	1195	1209
3-Leiter	-15400	920	929	938	947	957	966	976	986	996	1006	1016	1026	1037	1048	1058	1069
Delta Jahreskosten 2-Leiter - 3-Leiter		93	96	99	102	105	108	111	114	117	120	123	126	130	133	136	140
Kumulierte Delta Jahreskosten 2-Leiter - 3-Leiter		93	189	288	390	495	602	713	827	943	1063	1186	1313	1442	1575	1712	1851
Delta Investitionskosten 2-Leiter - 3-Leiter	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400	4400