



Schlussbericht vom 6. Dezember 2018

V0697 Zürich, Tièchestrasse 51-57

Vergleich verschiedener Energieerzeugungskonzepte in vier Mehrfamilienhäusern



© ewz 2018



**Kanton Zürich
Baudirektion**

Datum: 6. Dezember 2018

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz)
Tramstrasse 35, CH-8050 Zürich
www.ewz.ch

Autoren:

Lennart Rogenhofer, ETH Zürich, lennartr@ethz.ch
Pascal Leumann, ewz, pascal.leumann@ewz.ch

BFE-Programmleitung:	Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch
BFE-Projektbegleitung:	Marc Köhli, koehli@enerconom.ch
BFE-Vertragsnummer:	SI/501000-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

An der Tièchestrass in Zürich wurden vier verschiedene Energieerzeugungskonzepte erstellt und anschliessend in vier neu erstellen Mehrfamilienhäusern umgesetzt, die Energieerzeugungsanlagen in Betrieb genommen und miteinander verglichen. Alle vier Konzepte beinhalten die Nutzung von Erdwärme als Hauptenergiequelle, wobei die Häuser über eine monovalente Wärmepumpe mit Wärme zum Heizen und für die Brauchwarmwassererzeugung versorgt werden.

Das Energieversorgungskonzept von Haus B beinhaltet eine Standard-Anlage (anschliessend Referenz-Anlage genannt) nach heutigem Stand der Technik mit 40 mm Doppel-U-Erdsonden aus Polyethylen. Dabei werden die Erdsonden im Sommer über Freecooling regeneriert.

Im Haus A wurden CO₂-Erdsonden mit einer Standard-Wärmepumpenanlage verbaut. Es wurden drei Chromstahlwellrohre auf einer Tiefe von 200 m verbaut und mit CO₂ als Wärmeträgermedium befüllt. Der Einbau dieser Rohre war deutlich aufwendiger als der Standardfall, da diese Rohre viel steifer als die Kunststoffsonden sind. Mit dem CO₂ als Wärmeträgermedium erhoffte man sich eine bessere Jahreseffizienz gegenüber dem Referenzhaus, da keine Solepumpe betrieben werden muss.

Im Haus C wurden ebenfalls Standard-Erdsonden installiert. Diese Anlage ist auf dem Dach mit PVT-Kollektoren ausgestattet, welche im Sommer die Erdsonden zu 100 % regenerieren sollen.

Im Haus D wurde auch eine -Erdsonden-Anlage installiert, welche auf einer witterungsgeführten Regelung anhand von Meteo-Daten basiert.

Alle vier Anlagen wurden über ein volles Messjahr vom 15.08.2017 bis 14.08.2018 betrieben und ausgewertet. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse:

	Haus A	Haus B	Haus C	Haus D
	CO ₂	Referenz	PVT Regeneration	Witterungs- regelung
JAZ System	2.7	3.9	3.3	3.4
Normierter COP des Systems	3.5	4.9	4.7	4.5
RH [MWh]	26.3	27.8	26.4	32.2
BWW [MWh]	22.1	17.0	18.0	19.1
RH [kWh/m² EBF]	18.7	18.3	24.2	24.5
BWW [kWh/m² EBF]	15.7	11.2	16.5	14.6
Regeneration [%]	18%	34%	104%	24%
Kompressor Laufzeit vom Maximalwert der Häuser [%]	100%	70%	82%	84%
Mittlere Sondentemperatur Oktober–April [°C]	10.8	11.9	12.8	11.4
Mittlere Sondentemperatur Mai–September [°C]	15.1	14.3	18.0	14.4

Das Energieerzeugungskonzept von Haus A konnte die Erwartungen nicht erfüllen. Die Arbeitszahl lag deutlich unter dem Wert der Referenzanlage obwohl keine Solenpumpe betrieben wurde. Die Verdampfungstemperatur lag im Durchschnitt im Bereich von 5–7 Kelvin (K) tiefer gegenüber den anderen Anlagen, was unter anderem die längeren Laufzeiten der Komponenten sowie die schlechtere Effizienz erklärt. Die Gründe, die dazu führten, sind nicht abschliessend klar, haben jedoch mit der Funktionsweise und der Auslegung der CO₂-Erdsonden einen Zusammenhang. Die Auslegung der Erdsonden zusammen mit der Wärmepumpe müsste weiterentwickelt und optimiert werden. Dies müsste von einem einzelnen Hersteller gemacht werden, was in diesem Projekt nicht der Fall war. Erfreulich funktionierte diese innovative Anlage immer zuverlässig, weshalb die Energieversorgung durchwegs sichergestellt war.

Die Technik der CO₂-Erdwärmesonde funktionierte, jedoch leider nicht mit der erhofften Effizienz. Damit diese Technik wirtschaftlich eingesetzt werden kann, muss diese weiterentwickelt werden, um die Gesamteffizienz deutlich verbessern zu können. Mit der CO₂-Erdwärmesonde ist kein Freecooling möglich. Dass somit für das Freecooling zusätzliche Rohre in den Boden eingezogen werden müssen, muss als zusätzlicher Nachteil von diesem System gewertet werden.

Beim Haus C konnte im Jahresmittel rund 104 % der Wärmemenge, die der Erdsonde entzogen wurde, über die PVT-Anlage regeneriert werden. Durch den zusätzlichen Betrieb der Solepumpe sowie der Umwälzpumpe zum Betrieb der PVT-Anlage wurde eine um 0.6 schlechtere Arbeitszahl gegenüber dem Referenzhaus gemessen. Mit der Normierung vom Verhältnis Heizung zu Brauchwarmwasser war der COP-Wert nur um 0.2 schlechter gegenüber der Referenzanlage. Die mittlere Erdsonden-Temperatur war rund 4 K höher als bei den anderen Anlagen. Der Effekt der optimaleren Bodentemperatur durch die Regeneration hatte in diesem ersten Messjahres noch keinen Einfluss. Die Regeneration über mehrere Jahre wird hingegen interessanter sein. Hier wird eine Effizienzsteigerung erwartet.

Der Betrieb der Solepumpen für das Freecooling respektive für die aktive Regeneration benötigte wesentlich mehr Strom und zeigte bei allen Systemen einen negativen Einfluss auf die Gesamteffizienz. Das Freecooling wurde andererseits von den Bewohnern sehr geschätzt, da dadurch im heissen Sommer 2018 in den Wohnungen immer angenehme Temperaturen herrschten. Da alle vier Energieversorgungskonzepte PV-Anlagen auf den Dächern beinhalten und beim Freecooling-Betrieb meist PV-Strom verfügbar ist, relativiert sich der Stromverbrauch des Freecooling-Betriebs bei direkter Verfügbarkeit vom Dach. Diese Kombination aus Erdsonden-Wärmepumpen mit PV hat sich sehr bewährt.

Die Resultate beim Haus D waren in den ersten Monaten vielversprechend. Leider hatte das System aufgrund technischer Probleme nicht immer optimal funktioniert. Dadurch resultierte über das gesamte Messjahr eine etwas geringere Gesamteffizienz gegenüber der Referenzanlage. Die technischen Probleme wurden mittlerweile behoben und es wird eine zusätzliche Auswertung während der Heizperiode 2018/2019 gemacht werden. Die Resultate werden im Sommer 2019 publiziert.

Alle Heizsysteme funktionierten zuverlässig und die Gebäude könnten durchwegs sicher versorgt werden. Dass die Referenzanlage schlussendlich die beste Gesamteffizienz vorwies, war einerseits überraschend, andererseits zeigt dieses Resultat, dass im Praxisbetrieb oftmals der Einsatz von bewährter Standardtechnik gegenüber erweiterter und komplizierterer Technik vorzuziehen ist. Die hohe Regeneration mit 34 % durch Freecooling bei der Referenzanlage ist dadurch zu erklären, dass

die Fussbodenheizungen vom Haus C ebenfalls über die Referenzanlage von Haus B gekühlt wurden. Dies weil durch die aktive Regeneration beim Haus C nur ein sehr begrenzter Freecoolingbetrieb möglich wäre. Diese zusätzliche Regeneration der Sonden der Referenzanlage hatte einen zusätzlich positiven Effekt auf das Endresultat zu Gunsten der Referenzanlage. Die Referenzanlage hätte im Quervergleich mit den anderen drei Anlagen auch ohne Freecooling von Haus C am besten abgeschnitten.

Take-home messages

- Bewährte Technik einsetzen, “keep it simple”
- CO₂-Erdwärmesonde funktioniert, war jedoch deutlich weniger effizient im Betrieb gegenüber der Referenzanlage. Technik vom Gesamtsystem muss verbessert werden.
- Die vollständige Regeneration der Sonden von Haus C funktioniert. Hier wird die langfristige Gesamteffizienz interessant sein.

Freecooling erhöht Eigenverbrauch der PV-Anlage und wird von Nutzern positiv empfunden.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei unseren Finanzierungspartner-/innen bedanken, die dieses Projekt ermöglicht haben:

- Stadt Zürich
ewz Stromsparerfonds
Tramstrasse 35, 8050 Zürich
- Kanton Zürich
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)
Walcheplatz 2, 8090 Zürich
- Schweizerische Eidgenossenschaft
Bundesamt für Energie (BFE)
Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen

Weiter bedanken wir uns insbesondere bei der Baugenossenschaft des Eidgenössischen Personals (BEP), der Eigentümerin der Liegenschaften, die uns ermöglicht haben, dieses Projekt in Ihrer Liegenschaft umzusetzen.



Inhaltsverzeichnis

1. Ausgangslage	7
2. Ziele des Projektes	8
3. Konzept – Anlagenbeschrieb.....	8
3.1 Anlagenkonzepte	8
3.1.1 Haus B (Tièchestrass 53): Basisvariante.....	10
3.1.2 Haus A (Tièchestrass 51): CO ₂ -Erdsonde	11
3.1.3 Haus D (Tièchestrass 57): Witterungsgeführte Regelung mit Meteo-Daten.....	17
3.2 Messkonzept.....	19
3.2.1 Haus B (Tièchestrass 53): Basisvariante.....	23
3.2.2 Haus A (Tièchestrass 51): CO ₂ -Erdsonde	23
3.2.3 Haus C (Tièchestrass 55): Solare Regeneration	23
3.2.4 Haus D (Tièchestrass 57): Witterungsgeführte Regelung mit Meteo-Daten.....	24
3.3 Vergleich der Konzepte.....	24
4. Ergebnisse	26
4.1 Wohnungsverteilung	26
4.2 Auswertung Allgemein	26
4.3.1 Haus B (Tièchestrass 53): Basisvariante.....	36
4.3.2 Haus C (Tièchestrass 55): Solare Regeneration	44
5. Diskussion	62
5.1 Allgemein.....	62
5.2 Plausibilisierung der Daten	62
5.3 Diskussion zu den verschiedenen Konzepten	62
5.3.1 Haus B (Tièchestrass 53): Basisvariante.....	62
5.3.2 Haus A (Tièchestrass 51): CO ₂ -Erdwärmesonde	62
5.3.3 Haus C (Tièchestrass 55): Solare Regeneration	66
5.3.4 Haus D (Tièchestrass 57): Witterungsgeführte Regelung mit Meteo-Daten.....	66
5.4 Vergleichen der Konzepte.....	67
6. Schlussfolgerungen	69
7. Anhang	72

1. Ausgangslage

Im Hinblick auf eine nachhaltige Energieversorgung in 20 bis 40 Jahren und dem Ziel der 2000 W Gesellschaft sucht das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) nach Möglichkeiten, innovative und umweltverträgliche Wärmeerzeugungs- und -versorgungslösungen an geeigneten Objekten umzusetzen.

Die Genossenschaft des eidgenössischen Personals Zürich (BEP) hat einen Ersatzneubau an der Tièchestrass 51 bis 65 in Zürich mit 8 Mehrfamilienhäusern gebaut. ewz Energiedienstleistungen hat den Auftrag für die Erstellung der Energieerzeugungsanlagen im Rahmen eines Energie-Contractings erhalten. Da die Mehrfamilienhaus-Einheiten jeweils einen vergleichbaren Energiebedarf aufweisen, eignet sich das Projekt gut zum Einsatz und Vergleich verschiedener Technologien. Der Vorschlag von ewz, unterschiedliche Energieerzeugungskonzepte zu realisieren, ist bei der Bauherrschaft positiv angenommen worden.

Im Konzept zur Versorgung eines der Mehrfamilienhäuser ist der Einsatz von CO₂-Erdsonden vorgesehen. Es sollen Erfahrungen mit Erdwärmesonden gesammelt werden, die mit CO₂ als Wärmeträger arbeiten und auf eine Solekreispumpe verzichten können.

Im ursprünglichen Konzept war vorgesehen, eines der Gebäude mittels einer einzelnen, tiefen Erdsonde, die sich aufgrund der höheren Temperaturen als Wärmequelle für Niederhub-Wärmepumpen eignet, zu versorgen. Die (Teil-) Regeneration der tiefen Erdwärmesonde sollte über PVT-Kollektoren (Konzept "Tiefe Erdwärmesonde") erfolgen. Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL des Kantons Zürich hat die Bewilligung der tiefen Erdsonde verweigert. ewz hatte gegen den Entscheid fristgerecht Rekurs eingereicht. Aufgrund der erneuten Stellungnahme vom AWEL wurde der Rekurs zurückgezogen, und das Projekt musste geändert werden. Diese Änderungen wurden im BFE Subventionsvertrag angepasst (August 2014). Das Konzept mit der tiefen Erdsonde wurde nicht realisiert.

Die CO₂-Erdsondenköpfe mit den Verbindungsleitungen zur Heizzentrale wurden im Januar/Februar 2016 installiert. Die weiteren HLKSE-Installationen wurden bis Oktober 2016 abgeschlossen.

2. Ziele des Projektes

Mit dem Projekt wurden folgende Ziele angestrebt:

- Erfahrungssammlung beim Einsatz von Erdsonden mit CO₂ als Wärmeträger
- Erfahrungssammlung beim Einsatz von PVT-Kollektoren
- Erfahrungssammlung und Beurteilung bezüglich der solaren Regeneration einer Erdsonden-Wärmepumpenanlage
- Vergleich der Gesamtsystemeffizienz der verschiedenen Energieerzeugungskonzepte
- Vergleich des witterungsgeführten Betriebes zu den weiteren Konzepten
- Effizienz-Vergleich verschiedener Arten, Solarstrom zu produzieren (PVT- Kollektoren, PV)

3. Konzept – Anlagenbeschrieb

3.1 Anlagenkonzepte

Abbildung 1 zeigt die Häuser A bis H (von Ost nach West) an der Tièchestrasse 51 bis 65. Das Objekt besitzt eine Länge von 240 m und ist aufgrund der Gebäudeausrichtung (18° Süd-West) und der exponierten Hanglage hervorragend für Solarnutzung geeignet. Es wird zudem erwartet, dass der Untergrund am Standort gut für Erdwärmennutzung geeignet ist.

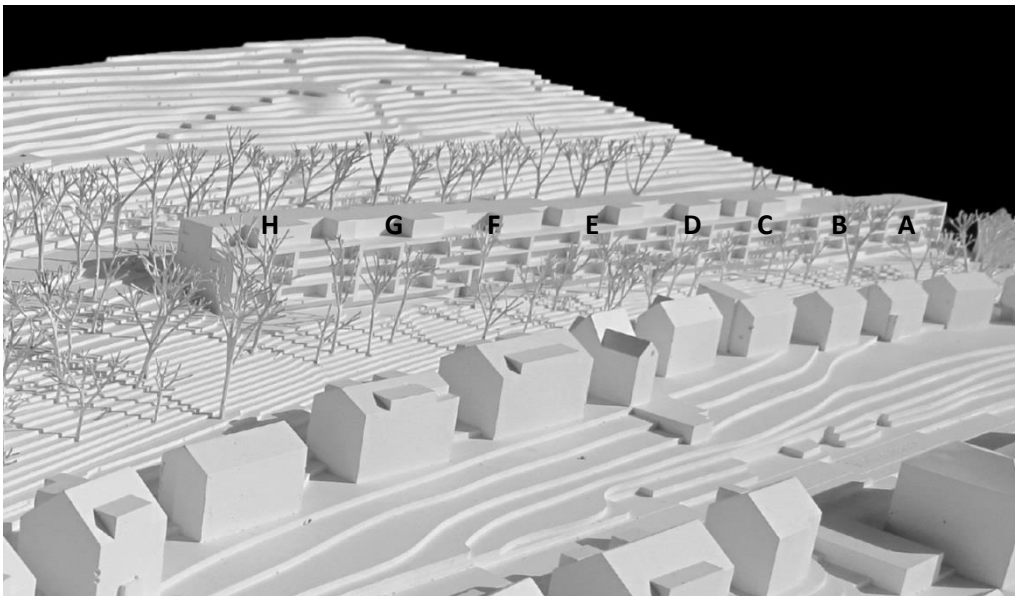


ABBILDUNG 1 STANDORT NEUBAU GENOSSENSCHAFT BEP, HAUS A - H, TIÈCHESTRASSE 51 BIS 65, ZÜRICH

In Zusammenarbeit mit der Ingenieurfirma Weisskopf Partner wurden verschiedene Energieerzeugungskonzepte geprüft und evaluiert. Davon wurde ein innovatives Konzept zur Realisierung an diesem Standort ausgewählt: CO₂-Erdwärmesonde.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die unterschiedlichen Konzepte und ihren jeweiligen Standort. Die Häuser E + F und G + H wurden nicht weiter untersucht und werden im Folgenden nicht mehr aufgeführt.

Die Leistungen und Energieverbräuche entsprechend den berechneten Werte von der kundenseitigen Heizungsplanung.

Die PV-Kollektoren sind im Contracting-Angebot für die Kundin eingerechnet und werden nicht durch Fördergelder im Zusammenhang mit diesem Antrag finanziert. Bei den PVT-Kollektoren bezahlt die Kundin den Kostenanteil, den eine konventionelle PV-Anlage in derselben Grösse kosten würde. Die Mehrkosten für die thermische Funktionalität des PVT-Kollektors werden durch Fördergelder gedeckt.

TABELLE 1 VORGESCHLAGENE ENERGIEZENTRALENKONZEPTE

Haus	A	B	C	D
Tièchestrasse	51	53	55	57
Konzept/ Zentrale	CO ₂ -EWS	Basis- objekt *)	Standard EWS und Solare Rege- neration	Standard EWS und Witterungs- geführt
Benötigte Wär- meleistung (inkl. BWW) [kW]	24.7	28.5	19.4	23.6
Bedarf RH [MWh/a]	36.1	36.7	28.2	39.2
Bedarf BWW [MWh/a]	22.8	31.6	16.5	24.5
Solarwärme	nein	nein	ja (PVT)	nein
PV-Kollektoren	ja	ja	ja (PVT)	ja
EBF [m ²]	1404	1518	1092	1312

*) Standard Erdwärmesonden 40mm Doppel-U-Sonden – PE

Alle Objekte können zur Klimatisierung Kälte über Geocooling (Direktkühlung über die Erdsonden ohne aktive Kühlung) beziehen. Die Lieferung von Kühlenergie wird nicht garantiert.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Konzepte erläutert.

3.1.1 Haus B (Tièchestrassen 53): Basisvariante

Die Wärmeversorgung von Haus B erfolgt über eine Standard-Wärmepumpe. Als Wärmequelle werden 3 jeweils ca. 220 m tiefe Duplex-Erdsonden installiert. Die Erdsonden wurden auf reinen Wärmezug ausgelegt. Dieses konventionelle Konzept dient als "Basisobjekt" zum Vergleich mit den anderen Konzepten.

Geocooling ist über eine Systemtrennung mit Anschluss an den Kühlkreis möglich. In Haus B ist eine VIESSMANN Vitocal 350-G, Typ BW 351 Wärmepumpe verbaut mit dem Kältemittel 410A.

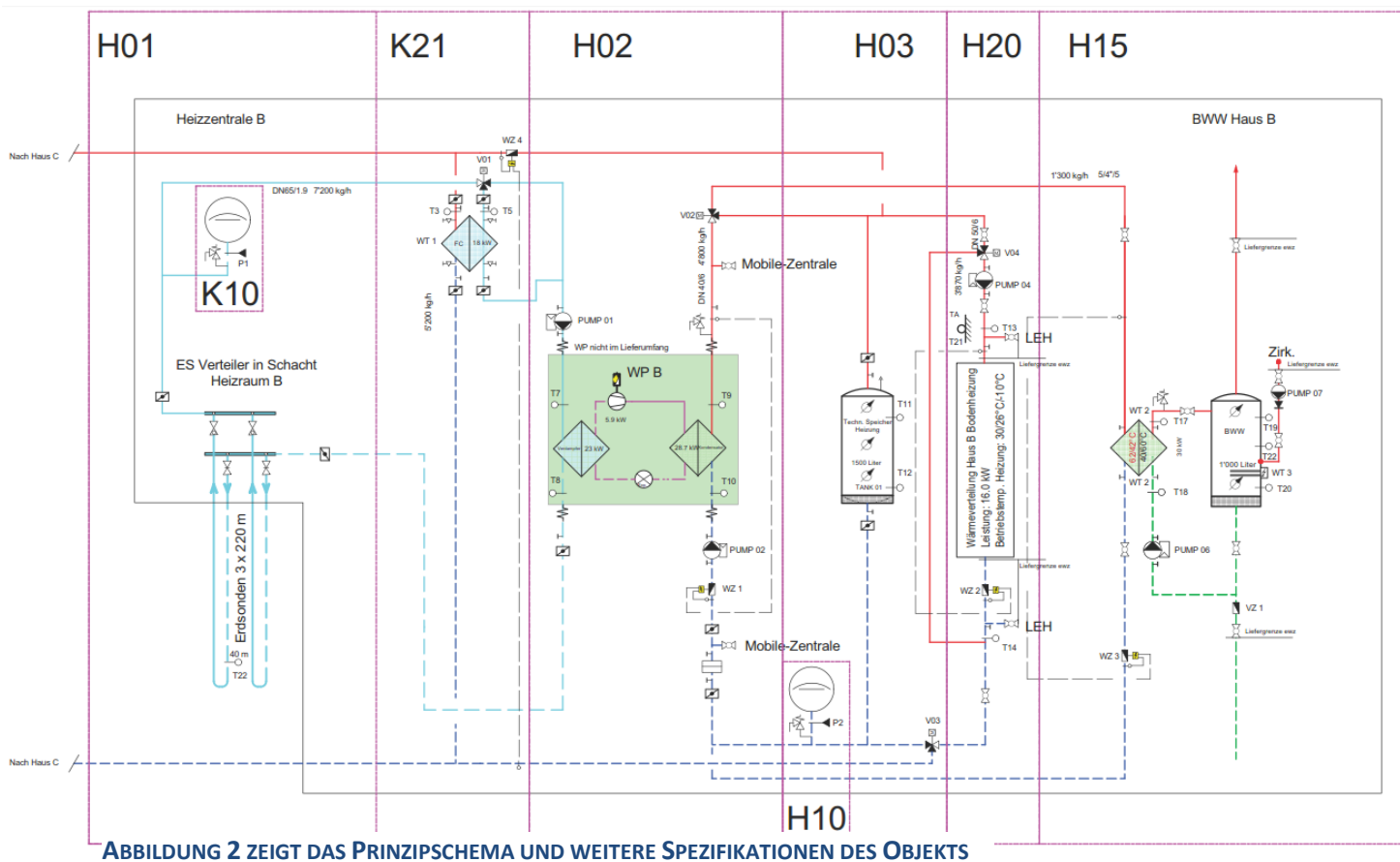


ABBILDUNG 2 ZEIGT DAS PRINZIPSHEMA UND WEITERE SPEZIFIKATIONEN DES OBJEKTS

Heizleistung (inkl. LE), kW	21.4
Besonderheit:	-
Erdsonden:	Standard
Wärmepumpe:	1 x Standard (1 Haus)
Kollektoren:	Photovoltaik
Freecooling:	Standard über EWS

*Die Lufterhitzer (LEH) werden alle von der Gruppe Fussbodenheizung mit Wärme bedient.

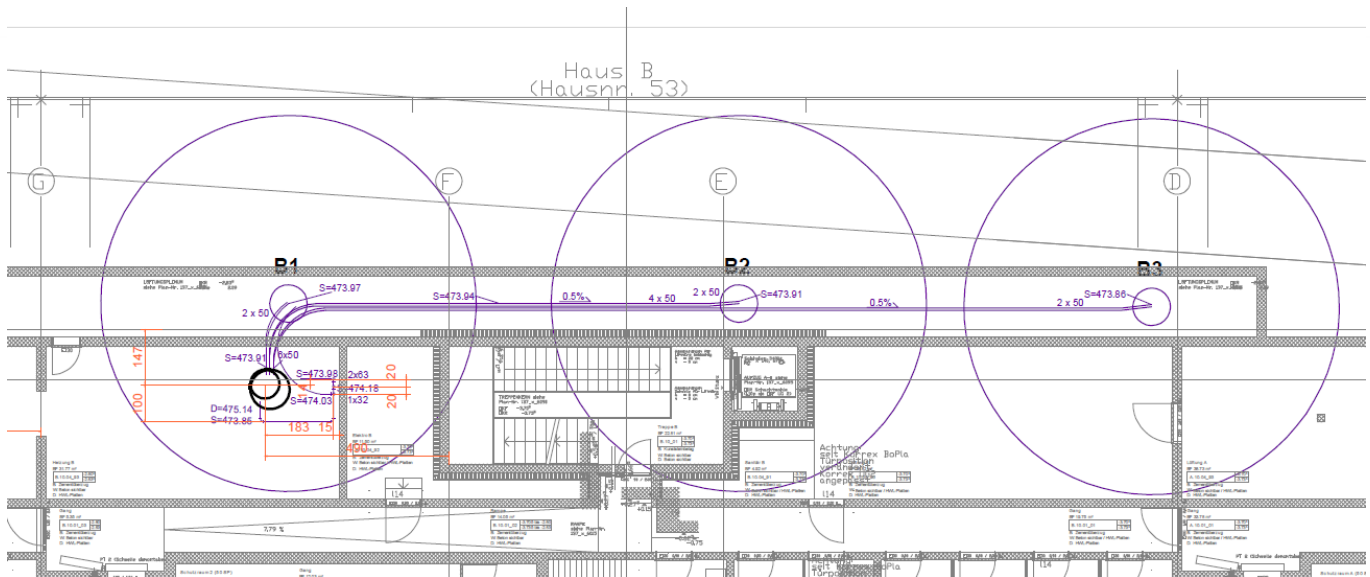


ABBILDUNG 3 LAGEPLAN DER ERDSONDEN (HAUS B)

3.1.2 Haus A (Tièchestrass 51): CO₂-Erdsonde

Bei Erdsonden mit CO₂ als Wärmeträger kann auf eine Umwälzpumpe im Primärkreis verzichtet werden, da der Transport des Wärmeträgers durch natürliche Konvektion gewährleistet wird. Es wurde ein gewelltes Chromstahlrohr als Erdsonde eingesetzt werden. Diese Konstruktion wurde vom Hersteller Brugg Rohrsysteme GmbH in jahrelanger Forschung für diesen Einsatz optimiert. Die CO₂-Erdsonden werden für das Haus A umgesetzt. In diesem Aufbau wird auf die CO₂-Sonde ein Wärmetauscher installiert, welcher die CO₂-Sonde vom Kühlmittelkreislauf der Standard-Wärmepumpe abgrenzt.

Bei dieser Anlage wurde messtechnisch untersucht, ob durch den Wegfall der Solekreispumpe eine höhere Gesamtsystemeffizienz im Vergleich zur Basisvariante (Haus B) erreicht werden kann. Über die CO₂-Erdsonden kann kein Geocooling realisiert werden. Es wurde parallel mit den CO₂-Erdsonden ein U-förmiges PE-Rohr mit ins Bohrloch eingezogen. Über dieses PE-Rohr wird das Geocooling gewährleistet. Damit hat die Anlage dieselbe Funktionalität wie die Standardanlage zum Vergleich.

In Haus A ist eine Scheco, R407 Wärmepumpe verbaut.

*Die LE = Luftherhitzer werden alle von der Gruppe Fussbodenheizung mit Wärme bedient.

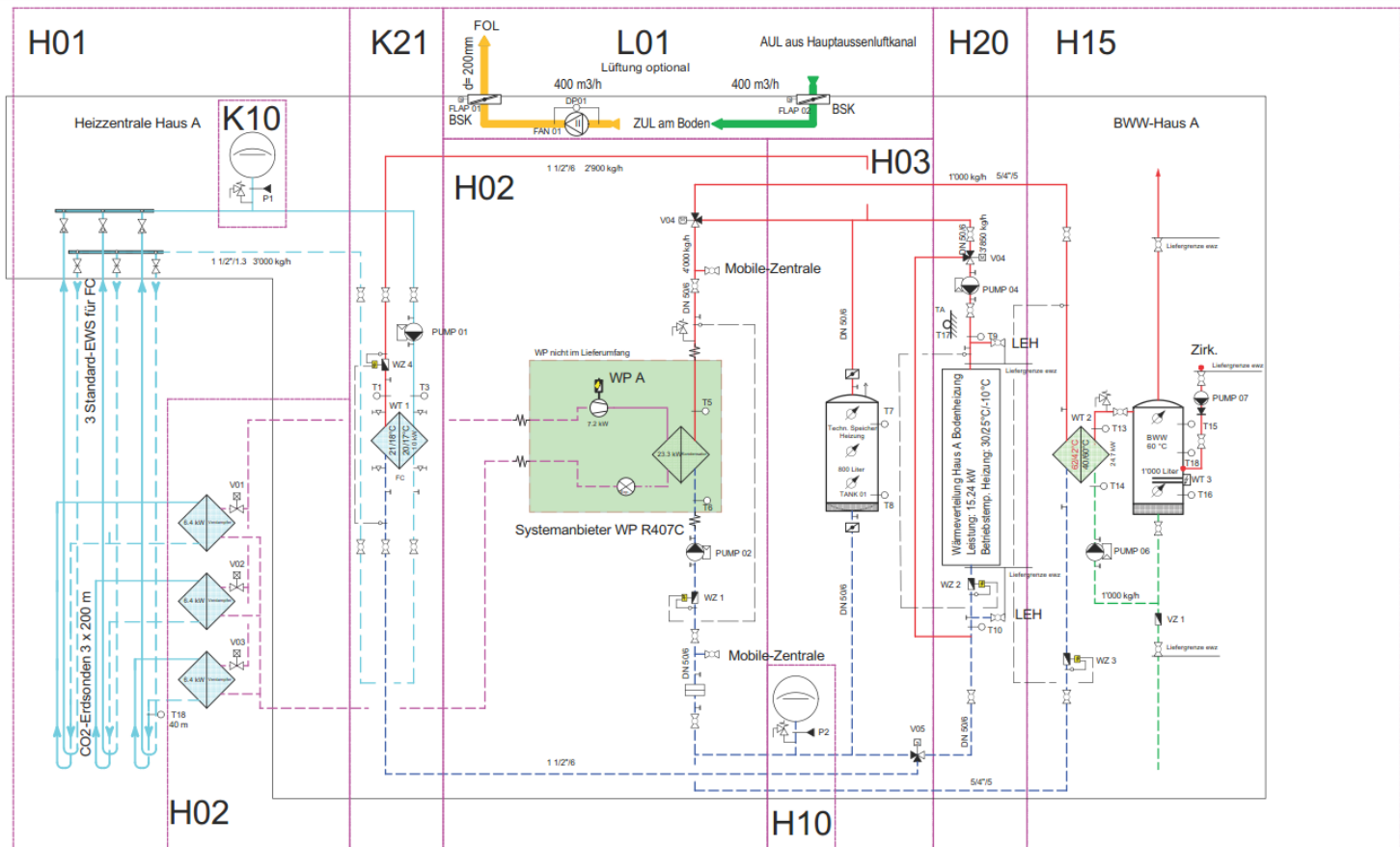


ABBILDUNG 4 ANLAGE MIT CO₂-ERDWÄRMESONDEN (HAUS A)

Heizleistung (inkl. LE), kW	19.8
Besonderheit:	CO2-Erdsonden mit Freecooling PE-Rohren
Erdsonden:	CO2-Sonden
Wärmepumpe:	1 x Standard (1 Haus)
Kollektoren:	Photovoltaik
Freecooling:	Ja (zusätzliche Sonden)

*Die LE = Lufterhitzer werden alle von der Gruppe Fussbodenheizung mit Wärme bedient.

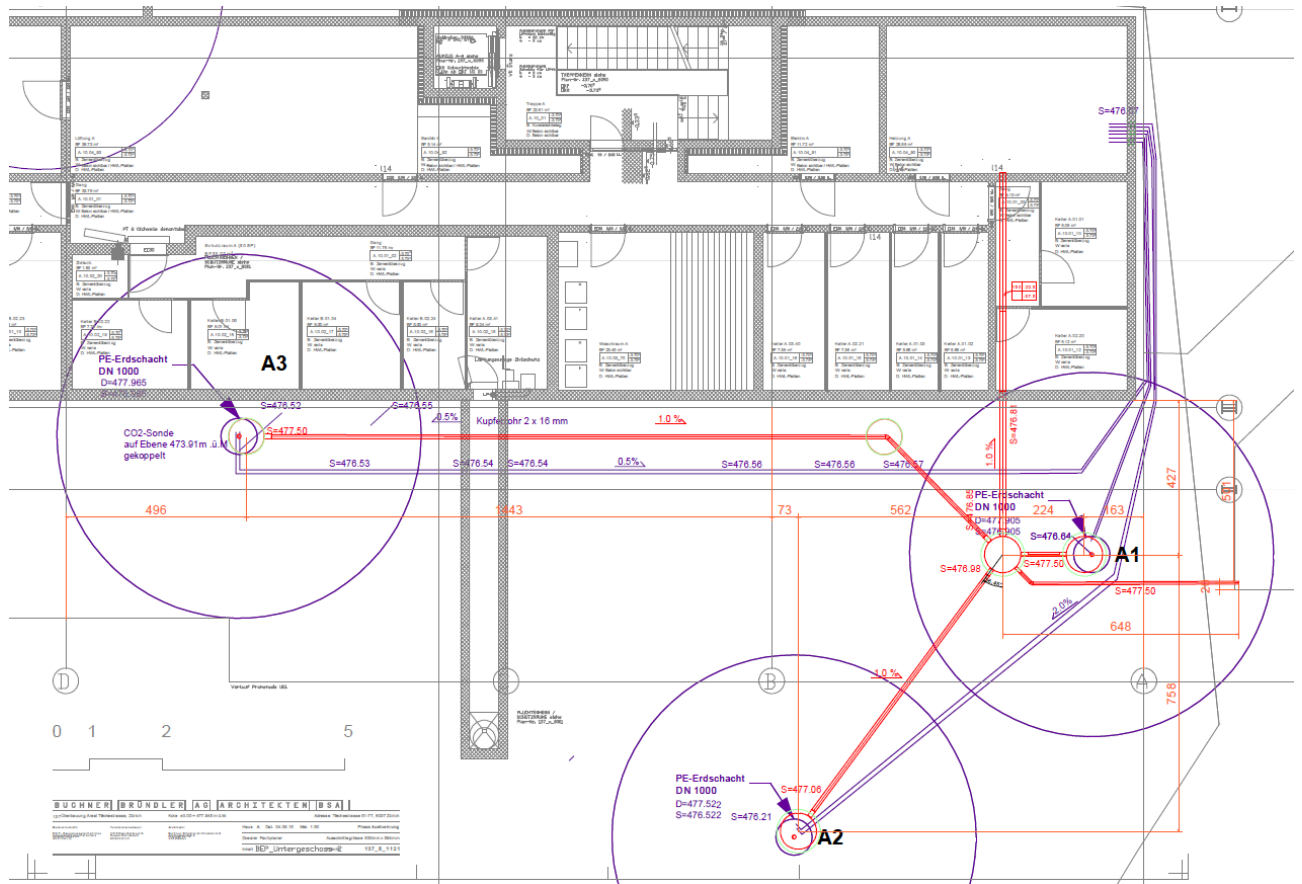


ABBILDUNG 5 LAGEPLAN DER ERDSONDEN HAUS A



BILD 1 BILDER EINBAU CO₂ SONDE



Haus C (Tièchestrass 55): Solare Regeneration



BILD 2 HYBRIDKOLLEKTOREN



BILD 3 UNTERE ANSICHT HYBRIDKOLLEKTOREN

eine Direktnutzung für Brauchwarmwasser wurde aus Gründen der Vereinfachung verzichtet.

In Haus C ist eine VIESSMANN Vitocal 350-G, Typ BW 351 Wärmepumpe verbaut mit dem Kältemittel 410A.

Zwei konventionelle Erdsonden mit einer Tiefe von jeweils 250 m wurden realisiert. Die Erdsonde wird über Wärme aus den -Kollektoren regeneriert, das sind Hybridkollektoren für die Generation von Strom und Wärme (vergl. Bilder 2 und 3). Durch den Wärmeeintrag wurde erwartet, dass die Erdsonden-Temperatur im Jahresmittel stabilisiert wird. Durch den Wärmeeintrag in die Erdwärmesonden wurden die PVT-Kollektoren im Vergleich zu einem Betrieb ohne Wärmeabfuhr gekühlt, was die Effizienz der PVT-Kollektoren hinsichtlich Stromproduktion (PV) verbessert. Der PV-Strom Ertrag wird

soweit möglich direkt für die Anlage genutzt. Der Überschuss wird ins Netz eingespeist.

Mit dieser Anlage wurde geprüft, ob sich Erdsonden für einzelne Häuser regenerieren lassen. Im Sommer liegt die Temperatur der PVT-Kollektoren zur Regeneration der Erdwärmesonden über der Temperatur für Gebäudekühlung, daher kann Gebäudekühlung über die Erdsonde (Geocooling) praktisch nicht erfolgen. Geocooling für Haus C erfolgt daher über die Erdsonden vom Referenzhaus B, welches somit mit der doppelten Freecooling Menge regeneriert wird.

Die PVT-Kollektoren wurden auf einen hohen Jahresertrag mit tiefen Mitteltemperaturen zur Regeneration der Erdsonden ausgelegt. Auf

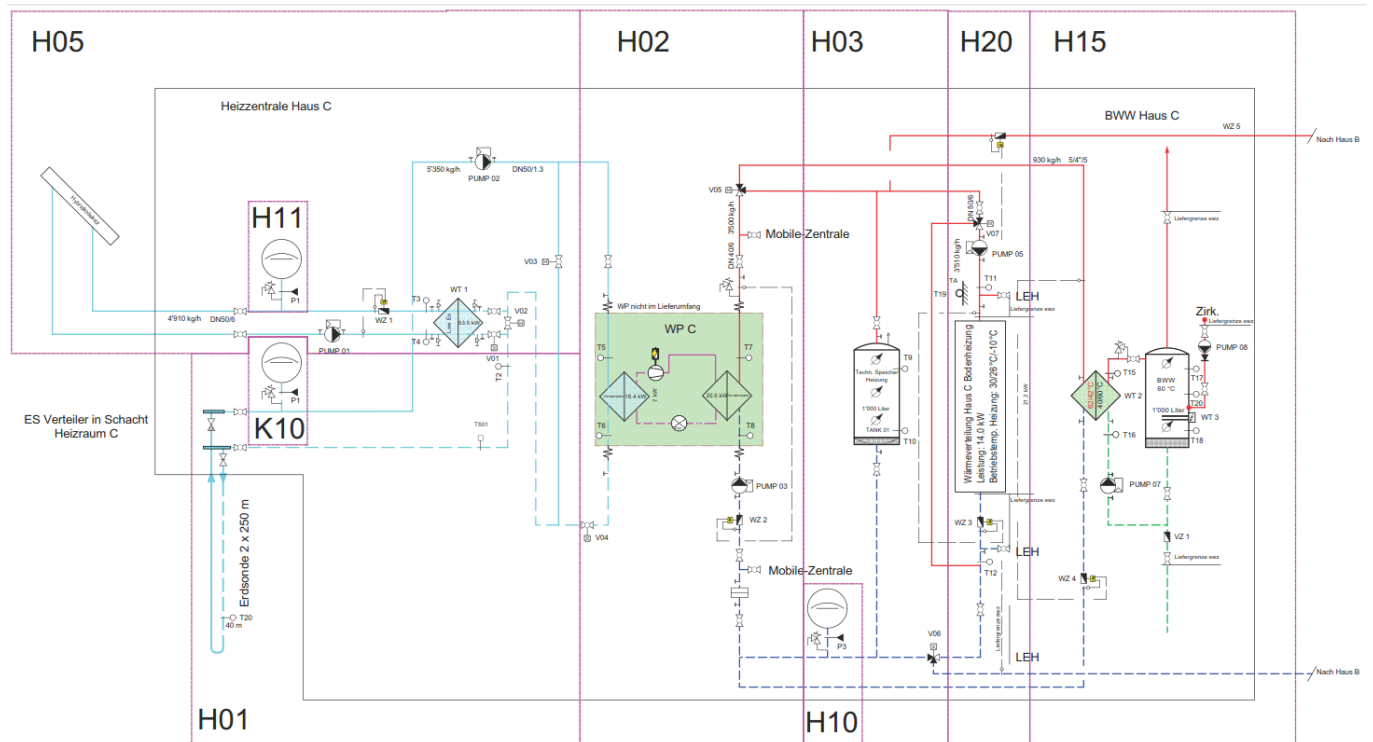


ABBILDUNG 6 ANLAGE MIT PVT-KOLLEKTOREN (HAUS C)

Heizleistung (inkl. LE), kW	15.4
Besonderheit:	Erdsonden Regeneration / Freecooling über Haus B
Erdsonden:	Standard
Wärmepumpe:	1 x Standard (1 Haus)
Kollektoren:	PV/T-Kollektoren
Freecooling:	Standard über EWS Haus B

*Die Lufterhitzer (LEH) werden alle von der Gruppe Fussbodenheizung mit Wärme bedient.

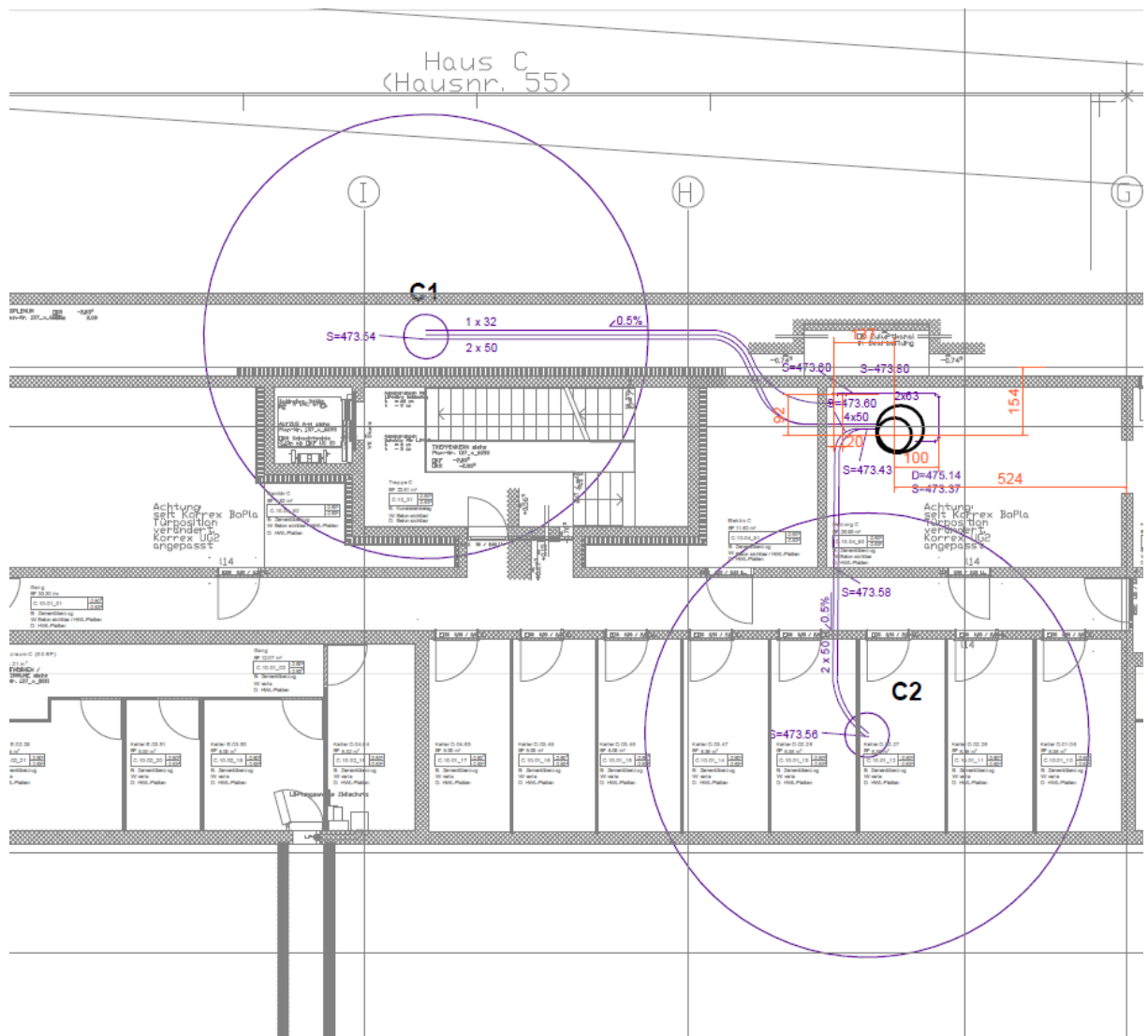


ABBILDUNG 7 LAGEPLAN ERDSONDEN HAUS C

3.1.3 Haus D (Tièchestrass 57): Witterungsgeführte Regelung mit Meteo-Daten

Die Anlage für das Haus D wurde mit einer witterungsgeführten Regelung der Firma *eGain* ergänzt, die mit Meteo-Daten einen vorausschauenden und somit effizienteren Betrieb ermöglicht. Dafür wird auf dem externen Temperatursensor eine berechnete, normierte Aussentemperatur anstatt der wirklichen Aussentemperatur vorgegeben. Diese Ergänzung soll einen direkten Vergleich des witterungsgeführten Betriebes zu den weiteren Konzepten, insbesondere zum Basisobjekt, ermöglichen.

In Haus D ist eine VIESSMANN Vitocal 350-G, Typ BW 351 Wärmepumpe verbaut mit dem Kältemittel 410A. Die Lufterhitzer (LEH) werden alle von der Gruppe Fussbodenheizung mit Wärme bedient.

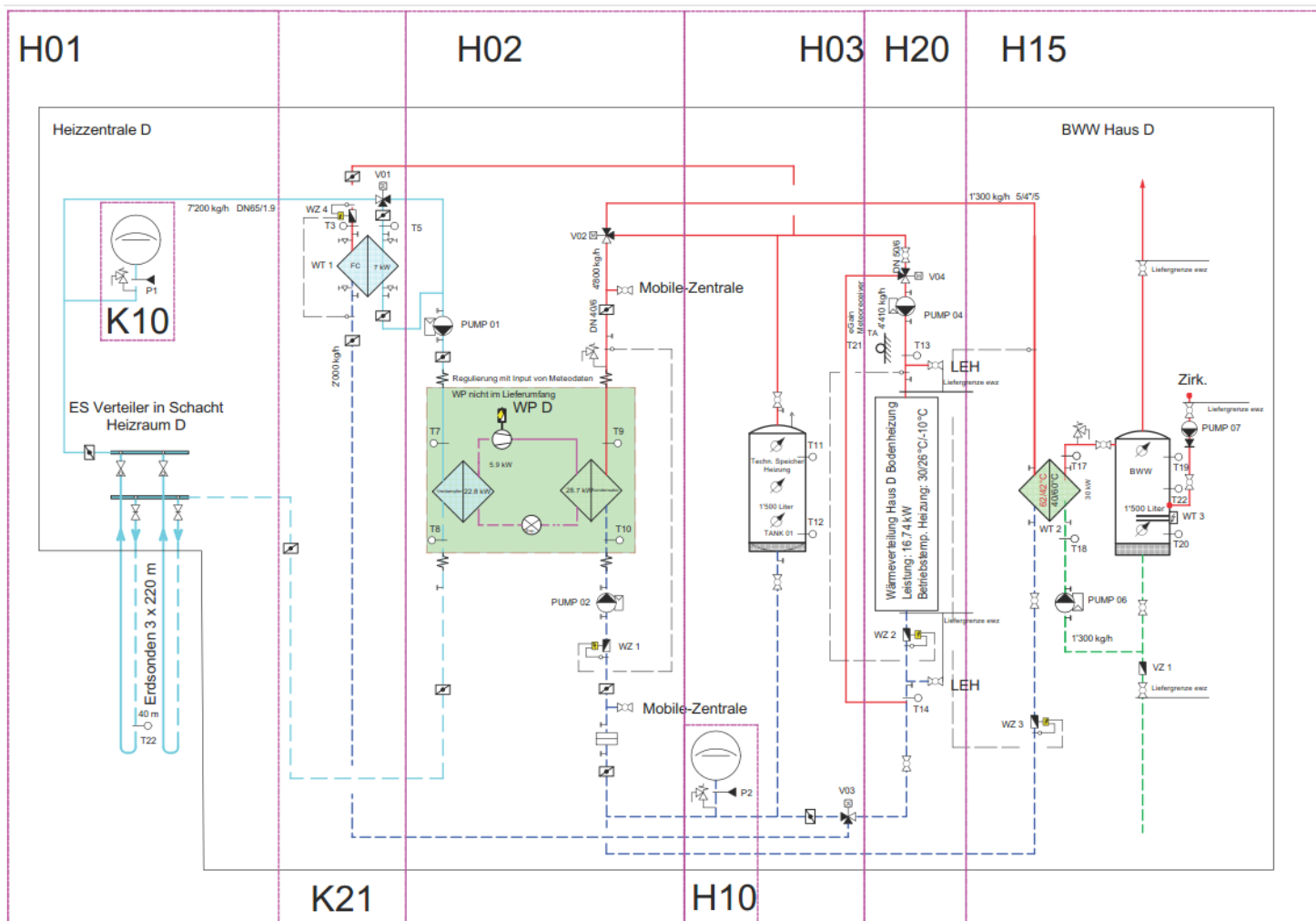


ABBILDUNG 8 ANLAGE MIT WITTERUNGSGEFÜHRTER REGELUNG (HAUS D)

Heizleistung (inkl. LE), kW	18.5
Besonderheit:	Meteo-Daten Regelung
Erdsonden:	Standard
Wärmepumpe:	1 x Standard (1 Haus)
Kollektoren:	Photovoltaik
Freecooling:	Standard über EWS

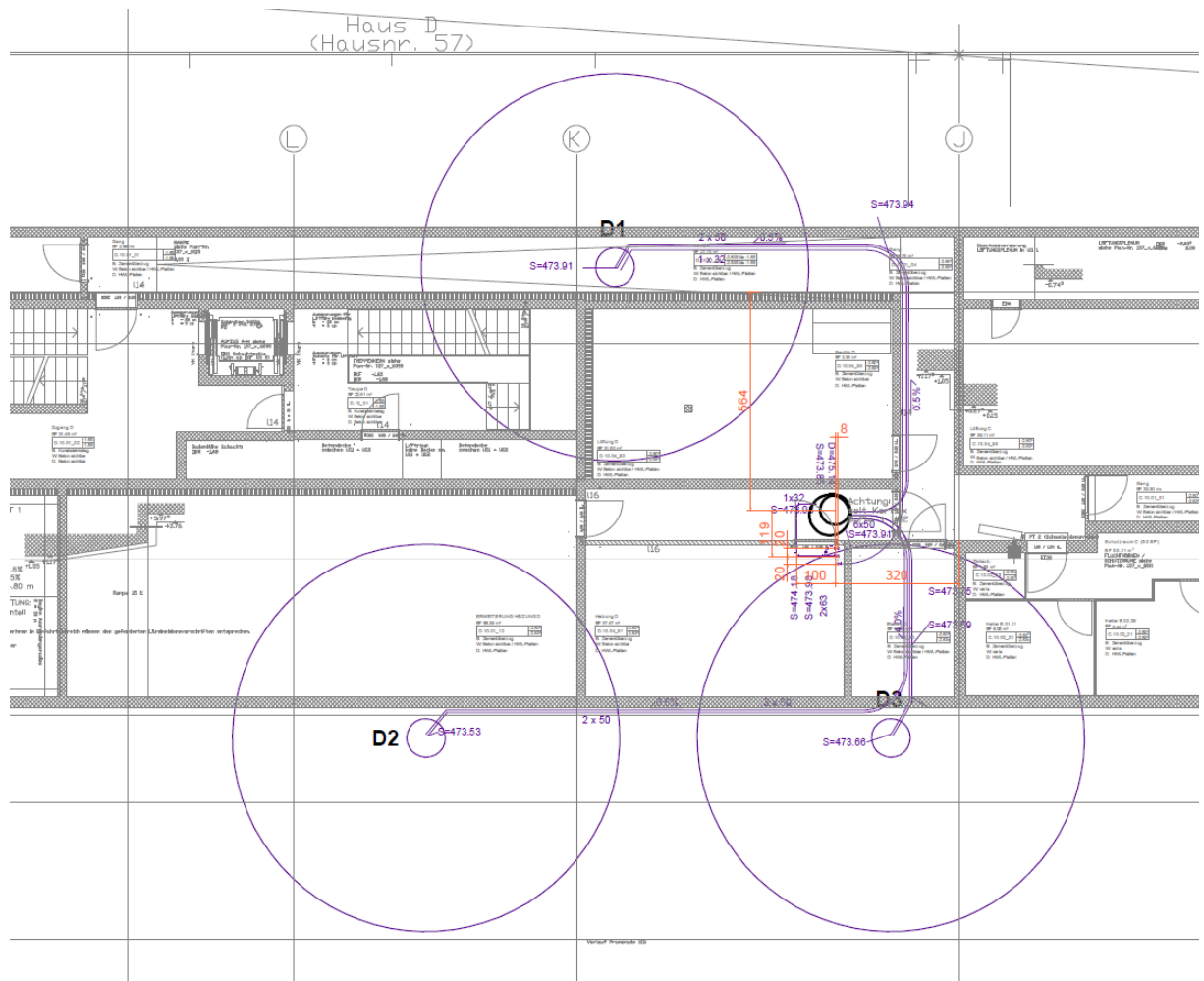


ABBILDUNG 9 LAGEPLAN ERDSONDEN HAUS D



3.2 Messkonzept

Das vorliegende Projekt bietet die Möglichkeit, die Machbarkeit und Effizienz der unterschiedlichen Erdwärme-Konzepte an ähnlichen Objekten am gleichen Standort miteinander vergleichen zu können.

Gemäss den Prinzipschemas wurden in allen vier Häusern die Wärmeflüsse aufgenommen. Um die Effizienz der verschiedenen Energieerzeugungskonzepte miteinander vergleichen zu können, müssen die in



Tabelle 2 beschriebenen Parameter aus den Messdaten berechnet werden. Die Messdaten werden in Intervallen von höchstens 15 Minuten aufgezeichnet. Die detaillierte Datenerfassung ermöglicht nachträglich weitere Auswertungen.

Der Hauptfokus der Messungen und anschliessenden Auswertungen liegt auf folgenden Fragestellungen:

- Plausibilisierung aller Messdaten
- COP Berechnung Wärmepumpen (nur Verdichter und mit Hilfsbetrieben)
- JAZ Kalkulation pro Variante (inkl. Berücksichtigung des Nutzerverhaltens (Raumtemperaturen, Energieverbrauch, EBF, Aussenwände – Haus A, ...))
- Kosten/Nutzen Vergleich der verschiedenen Varianten und als Gesamtsystem



Tabelle 2 stellt ausserdem die provisorisch geschätzten Parameter dar, die in einer ersten Messphase plausibilisiert werden sollen (insbesondere WMZ für Wasser-Glykol-Gemisch).



Tabelle 2 Erwartete Parameter der Varianten

Haus	A	B	C	D
Variante	CO ₂ -EWS	Basisobjekt	Solare Rege- neration	Witterungs- geführt
Wärmebedarf Heizung und Warmwasser [MWh/a]	58.9	68.3	44.7	63.7
angenommene JAZ WP aus Auslegung	≈ 4	≈ 3.5	≈ 4	> 3.5
Deckungsgrad Regeneration ***)	5-10%	5-10%	~100% *)	5-10%
Auslegung Quellentemperatur EWS	-3°C	-3°C	-3°C	-3°C
Anzahl EWS	3 x 200 m **)	3 x 220 m	2 x 250 m	3 x 220 m
EWS-Abstand	≈10 m	≈10 m	≈10 m	≈10 m
EBF [m ²]	1404	1518	1092	1312
Sonden länge pro EBF [m/m ²]	0.43	0.43	0.46	0.50

*) Je nach nutzbarer Dachfläche für Kollektoren

**) Angabe Hersteller CO₂-Erdwärmesonden (Brugg Rohrsysteme GmbH)

***) Deckungsgrad Regeneration:

Bei den Häusern B und D erfolgt eine indirekte Regeneration durch das Freecooling – der Deckungsgrad kann berechnet werden. Die 0% sind somit nicht ganz korrekt. Beim Haus A kann nicht mit den CO₂-EWS gekühlt werden. Deshalb wurden zusätzlich PE-Rohre eingezogen für das Freecooling. Dadurch erfolgt ebenfalls eine indirekte Regeneration im Bereich der Sonde.

Im Haus C kann mit den Erdsonden kein Freecooling erfolgen, weil diese aktiv mit der PVT-Anlage regeneriert werden. Um den Mietern denselben Nutzen zu bieten, wird das Freecooling vom Haus C über das Haus B betrieben. Die Sonden vom Haus C werden aktiv von den PVT-Kollektoren regeneriert. Durch die Regeneration mit der Wärme vom Dach können bereits früh im Sommer relativ hohe Temperaturen im Erdreich erwartet werden. Kommen diese in die Nähe der Wohnungstemperaturen, kann kein Freecooling mehr stattfinden.

Die Verfahrenslängen und andere Details zu den EWS können aus den Diagrammen in den Systembeschreibungen der Häuser entnommen werden.

Folgende Annahmen wurden für die unterschiedlichen Technologien festgelegt:

Erdwärmesonde (Haus A-D)

- Zur Ermittlung des Wärmeentzugs aus der Erdsonde wurde der Stromverbrauch des Kompressors von der erzeugten Wärme der Wärmepumpe abgezogen.
- Die Erdsonden-Temperatur wurde in der Erdsonde gemessen. Die Temperatur des Vor- und Rücklaufes ist zur Messung der Erdsonden -Temperatur nicht geeignet, da diese bei Stillstand des Wärmeträgers die Umgebungstemperatur anzeigt.

Wärmepumpe (Haus A-D)

- Um die Effizienz der Wärmepumpe zu ermitteln, wurden die erzeugte Wärme und der dafür eingesetzte Strom gemessen.

Solare Wärme (Haus C)

- Die Wärme, die aus den PVT-Kollektoren in die Erdsonden des Haus C zur Regeneration eingespeist wird, wurde mit einem Wärmezähler erfasst.

Nutzer / Bewohner (Haus A-D)

- Die Wärmeabgabe wurde separat für Heizung und Warmwasser pro Haus gemessen. Die Heizwärme wurde pro m² Energiebezugsfläche, die Wärme für Warmwasser pro Bewohner bezogen, um Indikatoren zum Nutzerverhalten zu erhalten.

Im Folgenden wird das Messkonzept der unterschiedlichen Varianten aufgeführt.

3.2.1 Haus B (Tièchestrass 53): Basisvariante

Haus B dient als Referenzhaus und als Basiszenario für Vergleiche mit den anderen Häusern. Dabei soll der Nutzereinfluss (Lüftungsverhalten, Thermostat-Einstellung, Warmwasserverbrauch) und weitere verzerrende Elemente (Wärmeflüsse zu anderen Häusern etc.) identifiziert und soweit möglich berücksichtigt werden. Der Datenschutz ist in diesem Zusammenhang noch zu klären.

3.2.2 Haus A (Tièchestrass 51): CO₂-Erdsonde

ewz EDL verbaut im Haus A erstmals eine CO₂-Erdsonde. Es werden der Einbau und die Erfahrungen im Betrieb dokumentiert.

Neben der erwarteten höheren Effizienz der CO₂-Erdsonden bieten diese den Vorteil, dass durch den Einsatz von CO₂ als Wärmeträgerflüssigkeit, diese in wassergefährdeten Gebieten eingesetzt werden können. Diese Technologie könnte den Einsatz erneuerbarer Wärmeenergie an Standorten ermöglichen, an welchen es bis anhin aufgrund Gewässerschutzbestimmungen sehr schwierig war, geeignete erneuerbare Lösungen zu finden.

3.2.3 Haus C (Tièchestrass 55): Solare Regeneration

Die PVT-Anlage dient der solaren Regeneration der EWS. Folgende Fragestellungen stehen dabei im Vordergrund:

- Erfolgt eine vollständige Regeneration der EWS?
- Wie sinnvoll ist dieses Konzept für ein Einzelhaus mit zwei Sonden?

Weiter von Interesse können sein:

- Stromerzeugung PVT-Module im Vergleich zu PV-Modulen
- Wärmenutzung PVT-Modul in Erdsonden im Vergleich zum Stromverbrauch der zwei Umwälzpumpen. Dieselbe Betrachtung kann für die Betriebszeiten gemacht werden.

Die Studie „Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich“ der Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik der Stadt Zürich zeigt, dass die Regeneration von Erdsonden künftig an Bedeutung gewinnen wird. Mit der Einspeisung von Solarwärme in die Erdsonden von Haus C wird geprüft, inwiefern sich einzelne Erdsonden mit Solarenergie regenerieren lassen.



3.2.4 Haus D (Tièchestrassè 57): Witterungsgeföhrtè Règelung mit Meteo-Daten

Im Haus D wird èine witterungsgeföhrtè Règelung mit Meteo-Daten für èinen optimierten Betrieb im Jahresverlauf. Folgende Fragen sind dabei zu untersuchen:

- Welche Parameter sind für die Optimierung entscheidend?

Witterungsgeföhrtè Anlagenrègelungen werden vermehrt eingesetzt. Es sind verschiedene Systeme auf dem Markt erhältlich. Dieses Projekt erlaubt den direkten Vergleich zweier ähnlicher Objekte.

3.3 Vergleich der Konzepte

Die hohe Ähnlichkeit der Häuser bietet an, die Erkenntnisse der einzelnen Häuser miteinander zu vergleichen, z.B. anhand der unterschiedlichen JAZ. Ausserdem soll Bezug auf die Annahmen in

Tabelle 2 genommen werden.

3.4 Zusammenfassung Fragestellungen pro Variante

Die oben genannten Fragestellungen sollen zusammen mit einem Partner (Hochschule, z.B. Empa) erarbeitet werden. Mit der Empa wurde diesbezüglich ein Letter of Interest abgeschlossen.

TABELLE 3 ZUSAMMENFASSUNG FRAGESTELLUNG PRO VARIANTE

Nr.	Fragestellung	Haus	Erforderlich
1	Alle Messdaten plausibilisieren (insb. WMZ in Glykol)	A, B, C, D	Ja
2	COP Berechnung Wärmepumpen (nur Verdichter und mit Hilfsbetrieben) pro Konzept und im Vergleich	A, B, C, D	Ja
3	JAZ Kalkulation mit Berücksichtigung Nutzerverhalten (Raumtemperaturen, Energieverbrauch, EBF, Aussenwände...) pro Konzept und im Vergleich	A, B, C, D	Ja
4	Untersuchung Geocooling: Kosten/Nutzen, Betriebserfahrungen, Systemtemperaturen	A, B, D	Nein
5	Vollständige Regeneration EWS Haus C jährlich erfolgt? Sinnvoll für Einzelhaus mit zwei Sonden? Kosten-Nutzen Betrachtung	C	Ja
6	Stromerzeugung PVT-Module im Vergleich zu PV-Modulen	C	Nein
7	Wärmenutzung PVT-Modul in Erdsonden im Vergleich zu Stromverbrauch der zwei Umwälzpumpen. Dieselbe Betrachtung für Betriebszeiten	C	Nein
8	Betriebsoptimierung mit Meteodaten im Jahresverlauf. Welche Parameter sind entscheidend?	D	Ja
9	Planung SIA vs. IST: Vergleich Heizleistung, Wärmebedarf, Temperaturentwicklung EWS, Dimensionierung PVT, Dimensionierung WP, ...	A, B, C, D	Nein (hohe Relevanz ewz)
10	Modellierung und Simulation mit dynamischem Modell	A, B, C, D	Nein
11	Dimensionierung PV-Anlage im Vergleich zu Stromverbrauch Heizungsanlagen	A, B, C, D	Nein
12	Erfahrungen Einbau CO ₂ -EWS, Erfahrung Betrieb CO ₂ -EWS	A	Ja
13	Kosten/Nutzen Vergleich Gesamtsystem	A, B, C, D	Ja
14	Das ideale System aus den verbauten Komponenten: Energien, Ökologie, Kosten, Betrieb	A, B, C, D	Nein
15	Betriebskostenbetrachtung, LCA	A, B, C, D	Nein
16	Kostenvoranschlag vs. IST: Realisierung, 2. Schritt mit Betrieb	A, B, C, D	Nein
17	Modellierung und Simulation weiterer (hypothetischer) Systemvarianten, Vergleich mit reellem System	A, B, C, D	Nein



18	Bestimmung Potential für weitere Anwendungen	A, B, C, D	Nein
----	--	------------	------

4. Ergebnisse

4.1 Wohnungsverteilung

Als Grundlage für die Auswertung der Wohnungsdaten werden Informationen über die Nutzungsart und Zimmerverteilung innerhalb der einzelnen Häuser gesammelt.

Haus A und B weisen die identische Wohnungsaufteilung aus. Neben vier 2-Zimmer und vier 4-Zimmer Wohnungen ist in beiden Häusern im Untergeschoss eine KITA (Kindertagesstätte). In Haus C sind vergleichsweise eher grössere Wohnungen verbaut, mit zwei 5-Zimmer, einer 4-Zimmer, und zwei 3-Zimmer Wohnungen. Haus D bildet den Gegensatz dazu, mit eher kleineren Wohnungen, mit fünf 2-Zimmer, und 6 3-Zimmer Wohnungen.

TABELLE 4 VERGLEICH WOHNUNGSVERTEILUNG

	A	B	C	D
Anzahl Wohnungen				
1 - Zimmer	0	0	0	0
2 - Zimmer	4	4	0	5
3 - Zimmer	0	0	2	6
4 - Zimmer	4	4	1	0
5 - Zimmer	0	0	2	0
Sonstiges	Kita	Kita	-	-

4.2 Auswertung Allgemein

Für die Systemanalyse und als Grundlage für die im folgenden präsentierten Ergebnisse wurden Messdaten ab 15.08.2017 bis 14.08.2018 ausgewertet. Daten von August 2017 und August 2018 beziehen sich dementsprechend jeweils nur auf einen halben Monat. Durch eine Störung in der Datenaufzeichnung vom 24.07.2018 bis 31.07.2018 wurden für diesen Monat unvollständige Daten erfasst.

Zur Berechnung der relevanten Parameter wurden mathematische Formeln sowie die Nomenklatur der Parameter definiert. Diese sind im Anhang zu finden.

Falls nicht explizit erwähnt wurden Messdaten mit einer Auflösung/einem Zeitschritt von 15 Minuten betrachtet.

Zirkulationspumpe

Wie in Abbildungen 2 bis 5 der einzelnen Häuser dargestellt, ist jedes Haus mit einer Zirkulationspumpe für den BWW Bereich ausgestattet, welche Strom in der Kategorie 'übrige Hilfsbetriebe' braucht. Die Zirkulationspumpe zirkuliert Warmwasser um kürzere Lieferzeiten des Warmwassers zu den Verbrauchern zu ermöglichen.

Fragestellung 3: JAZ - Kalkulation

Für die Berechnung der AZ (Arbeitszahl) werden die ungefilterten Daten der relevanten Energie und Wärmehähler miteinander verglichen. Diese Analyse wurde auf monatlicher Basis durchgeführt.

Für die Arbeitszahl wird zusätzlich zum Wert der Wärmepumpe (Kompressor, Steuerung Wärmepumpe, Verdampfer- und Kondensatorpumpe als elektrische Verbraucher) ein Wert für den Kompressor allein, sowie für das Gesamtsystem (Wärmepumpe, Heizgruppenpumpe, Boilerladepumpe, Steuerung) berechnet.

$$AZ_{\text{Kompressor}} = \frac{Q_{\text{produziert}}}{E_{\text{Kompressor}}}$$
$$AZ_{\text{Wärmepumpe}} = \frac{Q_{\text{produziert}}}{E_{\text{Kompressor}} + E_{\text{Hilfsbetriebe Wärmepumpe}}}$$
$$AZ_{\text{System}} = \frac{Q_{\text{produziert}}}{E_{\text{Kompressor}} + E_{\text{Hilfsbetriebe Wärmepumpe}} + E_{\text{Sonstige Hilfsbetriebe}}}$$

Diese Werte beziehen sich auf gemessene Daten ohne weitere Rechnungen.

Um einen detaillierteren Vergleich der Systeme zu ermöglichen wurden verschiedene Filter angewendet um Daten in verschiedene Betriebspunkte zu sortieren. Ziel dieser Filter ist das Isolieren der Messdaten im Gleichgewichtszustand der Betriebspunkte BWW-Produktion und RH-Produktion.

Fragestellung 2: COP Wärmepumpen

Die folgenden Werte werden anhand von Messwerten berechnet:

▪ Mittlerer COP:

Für die Berechnung des mittleren COP werden jeweils nur Messpunkte im Gleichgewichtszustand betrachtet und je nach Nutzen des produzierten Warmwassers in die Kategorie BWW und RH aufgeteilt. Übergangswerte zwischen BWW- und RH-Produktion werden nicht betrachtet, um den Einfluss von Querflüssen beim Umstellen der Ventile zu minimieren. Aus gleichen Überlegungen werden Daten in den ersten 15 Minuten nach dem Umschalten zwischen Freecooling und Normalbetrieb nicht betrachtet.

Die Differenz zwischen AZ und mittlerem COP besteht also anhand von zwei gegenläufigen Phänomenen:

1. Startwerte Kompressor: Während dem Aufstarten des Kompressors läuft dieser noch nicht in seinem optimalen Betriebspunkt und hat dadurch ein niedriges Verhältnis von erzeugter Wärme zu verbrauchtem Strom. Diese Werte sind in der AZ enthalten, nicht jedoch im mittleren COP. Startwerte führen also zu einer tieferen AZ als mittlerem COP.
2. Kompressor abgeschaltet: Wird kein Strom vom Kompressor bezogen, kann kein COP berechnet werden. Es ist jedoch möglich, dass kurz nach dem Abschalten des Kompressors sich noch Restwärme im System befindet. Diese Restwärme fließt ins System und wird vom WZ erfasst. Es ergibt sich also eine höhere AZ, der mittlere COP bleibt gleich.

Da diese Phänomene gegenläufig sind, ist je nach Verteilung dieser Effekte der mittlere COP grösser als die AZ, oder die AZ grösser als der mittlere COP.

Messdaten werden in einer Auflösung von einem Datenpunkt alle 15 Minuten für jeden Monat separat analysiert und dann über die Monate gemittelt. Für das Simulationsmodell (Fragestellung 10 + 17) werden zusätzlich stündliche Daten ausgewertet.

▪ **Normierter COP**

Aus den Messdaten folgt, dass die Verteilung zwischen BWW und RH für die verschiedenen Gebäude unterschiedlich ist. Die Resultate sind in Tabelle 5 dargestellt. Da BWW- und RH-Produktion sich in COP unterscheiden, kann das unterschiedliche Verhältnis der produzierten Wärme zu einer Verzerrung der Resultate bei einem Vergleich der Systeme führen. Da Warmwasser für RH bei deutlich tieferen Temperaturen produziert wird als für BWW, ist der COP der RH-Wasserproduktion höher als der COP für BWW-Produktion.

Unterschiede in der Verteilung zwischen BWW- und RH-Produktion zwischen den Häusern haben diverse Ursachen wie beispielsweise Nutzerverhalten oder Anzahl Bewohner pro Wohnfläche. Um diese Differenz auszugleichen, kann mit dem berechneten Mittelwert des COP für RH- und BWW-Produktion eine normierte Arbeitszahl bei gleicher Verteilung zwischen BWW- und RH-Produktion in allen Häusern berechnet werden.

$$COP_{Normiert} = COP_{BWW} * \%BWW_{soll} + COP_{RH} * \%RH_{soll}$$

Diese Sollverteilung zwischen BWW- und RH-Produktion, sowie der daraus folgende COP ist normiert und nicht physikalisch fundiert. Die COP-Werte für BWW- und RH-Produktion sind rechnerisch nur auf Gleichgewichtswerten basiert und dienen nur als Anhaltspunkt für einen objektiveren Vergleich der Systeme.

Auch der normierte COP enthält nur Gleichgewichtszustände, somit entfallen alle Übergangszustände und alle Werte in Zeitschritten, bei welchen der Kompressor ausgeschaltet ist.

Fragestellung 4: Geocooling

Der Kühlbedarf und das Freecooling wird über zwei unterschiedliche Rechenwege ermittelt. Einerseits kann über den Wärmezähler der RH Gruppe mithilfe der Leistungswerte das effektive Kühlen mit einem sample and hold verfahren abgeschätzt. Dieser Wert wird im Folgenden als 'Effektives Kühlen' bezeichnet.

In einem zweiten Schritt wird mithilfe des Freecooling Sensors der Häuser A bis D der Kühlbedarf ermittelt. Dieser Wert ist genauer als der Rechenweg des Effektiven Kühlens, da hier kein Sampling durchgeführt werden muss. Dieser Wert wird in der Folge als 'Freecooling am Haus' bezeichnet.

Da das Freecooling von Haus B und C beide über die Erdsonden von Haus B fliessen, wird als dritter Begriff 'Freecooling am Bohrloch' eingeführt. Dieser beschreibt die Wärme, die durch Freecooling in die jeweilige Bohrlochgruppe zurückgeführt wird.

Fragestellung 6: Stromerzeugung PVT/PV

Eine Analyse der PV- und PVT-Produktion im Vergleich ist noch nicht erfolgt, da es Schwierigkeiten mit dem Zugriff auf den Logger der Solardaten gibt.

Fragestellung 10: Modellierung

Eine Modellierung in MATLAB wurde von Sarah Bourgarel an der EMPA Dübendorf erstellt. Zusätzlich wird eine Betriebsoptimierung und eine Designoptimierung in AIMMS durchgeführt. Die entstandenen Abschlussberichte sind im Anhang verfügbar. (Betriebsoptimierung in Master_Thesis_Bourgarel.pdf, Designoptimierung in Semester_Thesis_Rogenhofer.pdf)

Fragestellung 11: PV-Deckungsgrad

Der PV-Deckungsgrad über ein Jahr liegt bei 39 %. Es wurden im gesamten 141 MWh verbraucht, und 55 MWh PV-Strom produziert. Dieser Wert liegt deutlich unter dem erwarteten Wert vom 50 %, welches auf einen Teilausfall der PV-Anlage Ende 2017 zurückzuführen ist.

Es ergibt sich ein Lastdeckungsfaktor von 34 %, das heisst es konnten 34 % des Energiebedarfs direkt von PV vor Ort gedeckt werden, die restlichen 66 % mussten vom Netz importiert werden. Der Lastdeckungsfaktor wurde alle 15 Minuten berechnet und gemittelt.

$$LDF = \frac{\Delta PV_{Nützlich}}{\Delta E_{Bedarf}}$$

Der Versorgungs- Abdeckungsfaktor wurde auf 53 % berechnet. Dieser Anteil der produzierten PV-Leistung konnte vor Ort genutzt werden, die restlichen 47 % wurden an das Netz abgegeben. Der Versorgungs- Abdeckungsfaktor wurde alle 15 Minuten berechnet und gemittelt.

$$VAF = \frac{\Delta PV_{Nützlich}}{\Delta PV_{Produziert}}$$

Für die Monate August bis Dezember 2017 ist eine sehr tiefe totale von PV-produzierte Strommenge zu erkennen (< 2.5 MWh). Diese Reduktion ist auf einen Teilausfall der PV-Anlage mit einem defekten Wechselrichter und zwei nicht funktionierenden Wechselrichter-Strängen zurückzuführen. Auch im Juni 2018 wurde vergleichsweise wenig PV-Strom produziert, die Ursache hierfür ist unklar.

Die berechneten Werte für Lastdeckungs- und Versorgungsabdeckungsfaktoren lassen darauf schliessen, dass es noch Potential zur Verbesserung der Eigennutzung der PV-Energie gibt. In drei Monaten des Messjahres (Mai, Juli, August 2018) wurde mehr PV-Strom produziert als von der Anlage verbraucht wurde. Ein Zwischenspeicher oder gezielte Steuerung der Anlage könnte hier demnach zu 100 % Eigennutzung führen. So könnte z. B. Brauchwarmwasser vorproduziert werden, oder im Winter eine Wohnung vorgeheizt oder leicht überheizt werden, wenn die Sonne scheint und PV-Strom verfügbar ist, um Stromverbrauch vom Netz zu reduzieren. Eine aktive Nachfüllung des BWW Tanks, wenn PV-Strom verfügbar ist, ist bereits implementiert.

Dass eine Erhöhung der PV-Fläche auch wirtschaftlich begründet werden kann wird in der Semesterarbeit von Lennart Rogenhofer (EMPA/ETHZ) diskutiert, in welcher eine deutliche Erhöhung der PV Fläche für Haus B (von 60 auf 100 m²) aufgrund eines vereinfachten Modells vorgeschlagen wird. Laut Berechnungen der Semesterarbeit können zusätzliche Anschaffungskosten der Panels durch reduzierte Kosten im Stromeinkauf während der Lebensdauer der Panels aufgefangen werden.

Besonders interessant wird eine Erhöhung der PV Fläche auch dann, wenn Strom für den Haushalt oder Allgemeinstrom der Häuser gebraucht werden kann.

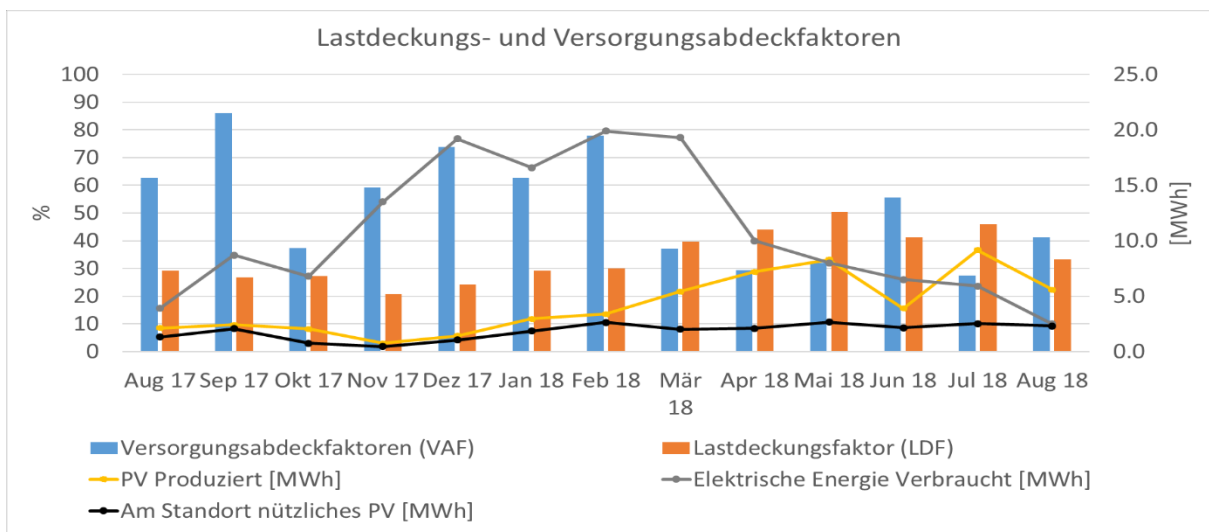


ABBILDUNG 10 LASTDECKUNGS- UND VERSORGUNGSABDECKFAKTOREN

4.3 Plausibilisierung der Daten

Allgemein

Ein erster Versuch den COP direkt aus Leistungsdaten zu berechnen musste verworfen werden, da die Sensoren im 15 Minuten Abstand einen Wert auslesen. Da es im realen System jedoch gewisse Zeitverzögerungen gibt, wird mit diesem Wert ein Stromverbrauch mit der Wärmeproduktion eines anderen Zeitpunktes verrechnet, welches zu nicht physikalischen Resultaten führt.

Um diese Problematik zu umgehen, wird mit der Differenz des Energiewertes über 15 Minuten gerechnet. Durch das zeitliche Integral über 15 Minuten und die anschliessende Umrechnung zurück auf Leistungswerte kann ein grosser Teil der zeitlichen Verschiebung eliminiert werden. Da jedoch die Energiezähler alle auf MWh Basis mit drei Kommastellen rechnen, ergeben sich Probleme der Diskretisierung. Werden zum Beispiel Werte zwischen 0.001 – 0.003 MWh gemessen und dies über 15 Minuten gemittelt, sind nur die Leistungswerte 4kW, 8kW und 12kW möglich. Dies entspricht nicht der Realität. Werden die Werte weiter gemittelt und stündliche bzw. tägliche oder monatliche Werte betrachtet, entschärft sich die Problematik der Diskretisierung. Eine Fehlerrechnung wurde durchgeführt und ist an dieses Dokument angehängt.

Fragestellung 1: Plausibilisierung der Messdaten

Die Sensoren wurden nach Einbau auf Funktionalität getestet und verifiziert.

Fragestellung 9: Planung SIA vs. Ist

Zwei Parameter, die es zu plausibilisieren gilt, ist die Wärmeverteilung zwischen produziertem BWW und RH, so wie die expliziten Werte des Wärme Bedarfs [kWh/m²/a] der MINERGIE-Heizwärmebedarf-Berechnung der Firma Kopitsis gemäss SIA 380/1 (Neubau) Norm. Werte pro m² beziehen sich auf die Energiebezugsfläche.

Tabelle 5 Vergleich Messwerte zur SIA 380-1 Norm

	A	B	C	D
SIA 380-1 Norm [kWh/ m²]				
Heizbedarf		25.3		
Warmwasser Bedarf		20.8		
Kühlbedarf		3.3		
Messwerte [kWh/m²]				
Heizbedarf	18.7	18.3	24.2	24.5
Warmwasser Bedarf	15.7	11.2	16.5	14.6
Kühlbedarf	4.4	4.3	5.1	7.3
Abweichung Absolut [kWh/ m²]				
Heizbedarf	-6.6	-7	-1.1	-0.8
Warmwasser Bedarf	-5.1	-9.6	-4.3	-6.2
Kühlbedarf	1.1	1	1.8	4
Abweichung Relativ [%]				
Heizbedarf	-26%	-28%	-4%	-3%
Warmwasser Bedarf	-25%	-46%	-21%	-30%
Kühlbedarf	33%	30%	55%	121%

Die aufgrund der SIA 380-1 Norm berechneten Bedarfswerte zeigen teilweise starke Abweichungen zu den gemessenen Werten. Grundsätzlich wurde der Kühlbedarf aller Häuser deutlich unterschätzt. Dies kann zum Beispiel daran liegen, dass die Messwerte nicht auf Heizgradtage normiert wurden, und keine Informationen zur effektiven Anwohnerzahl verfügbar sind. In Haus D gibt es durch die Witterungsregelungstechnologie besonders starke Abweichungen. Der vorgetäuschte Aussentemperaturwert führte also zu einem höheren Kühlbedarf. Heiz- und Warmwasserbedarf wurden eher überschätzt, mit der Ausnahme von Häusern GH, in welchen der Heizbedarf unterschätzt wurde.

Die starken Schwankungen in den Abweichungen der SIA 380-1 Werte zu den Messwerten ist insofern zu erklären, dass die Werte der Norm für alle Gebäude zusammengerechnet und auf die totale EBF aller Gebäude normiert wurde. So werden für jedes Haus die gleichen Bedarfswerte angenommen und Unterschiede zwischen den Häusern vernachlässigt. Es ist beispielsweise für Häuser A und GH ein höherer Heizbedarf zu erwarten als in den anderen Häusern, da diese als Randgrundstücke eine Aussenwand mehr besitzen. In Haus D wird durch die Witterungsregelung die Aussentemperatur normiert angepasst, welches einen unterschiedlichen Heiz- und Kühlbedarf zu den restlichen Häusern zur Folge hat. Zudem widerspiegeln sich in den Messwerten das Benutzerverhalten der Bewohner, was einen sehr grossen Einfluss auf die Verbräuche zur Folge hat (z. B. offene Fenster oder Warmwasserverbrauch).

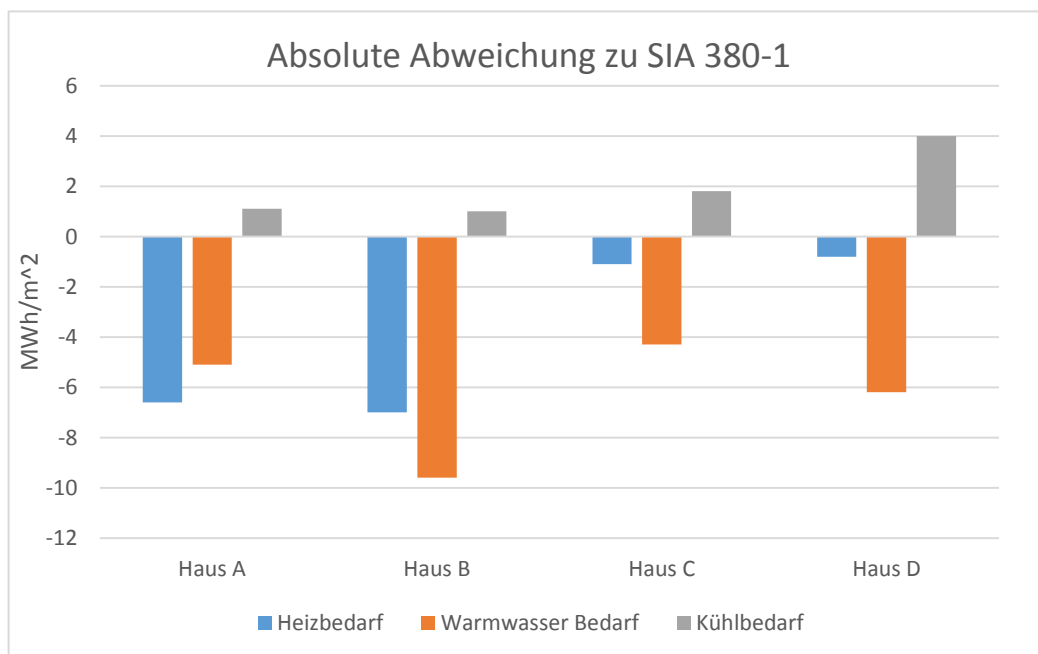


ABBILDUNG 11 ABSOLUTE ABWEICHUNG ZU SIA 380-1

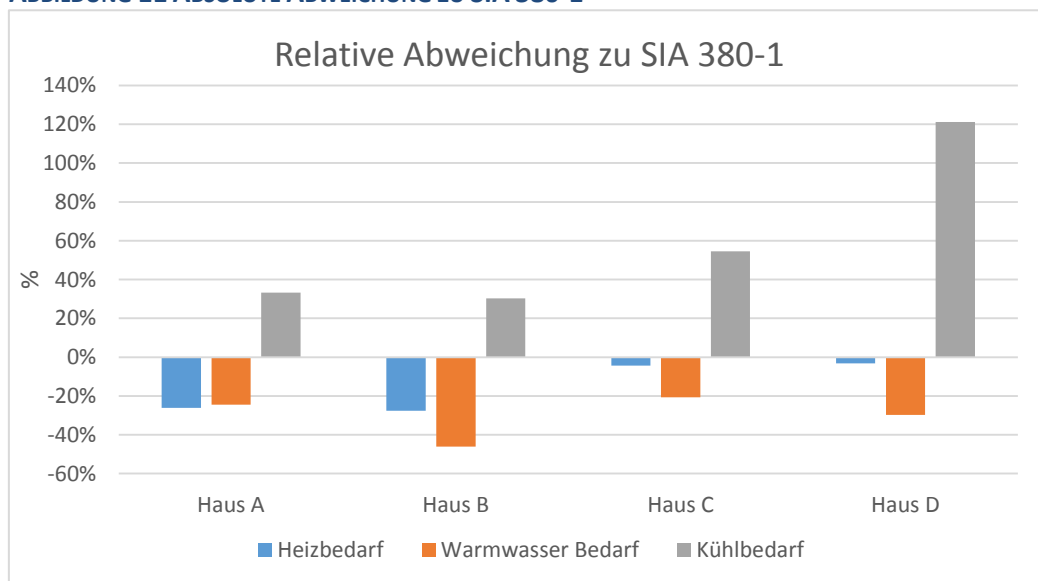


ABBILDUNG 12 RELATIVE ABWEICHUNG ZU SIA 380-1

In einer zweiten Berechnung der Firma Koptisis werden Häuser individuell betrachtet nach SIA380/1. In dieser Berechnung unterscheiden sich die Werte der einzelnen Häuser da die Anzahl Aussenwände etc. in einer detaillierten Rechnung miteinbezogen wurden.

Die Resultate in Tabelle 6 zeigen, dass diese zweite Rechnung deutlich präziser ist als die SIA Norm.

Tabelle 6 Vergleich Messwerte zur Koptisis Berechnung

	Haus A	Haus B	Haus C	Haus D
Koptisis Berechnung [kWh/ m ²]	CO₂	Referenz	PVT- Regena- ration	Witte- rungs- regelung
Heizbedarf	26	24	26	30
Warmwasser Bedarf	16	21	15	19
Kühlbedarf	6	6	6	6
Messwerte [kWh/m²]				
Heizbedarf	18.7	18.3	24.2	24.5
Warmwasser Bedarf	15.7	11.2	16.5	14.6
Kühlbedarf	4.4	4.3	5.1	7.3
Abweichung Absolut [kWh/ m ²]				
Heizbedarf	-7.0	-5.9	-1.6	-5.4
Warmwasser Bedarf	-0.5	-9.6	1.4	-4.1
Kühlbedarf	-1.6	-1.7	-0.9	1.3
Abweichung Relativ [%]				
Heizbedarf	-27%	-24%	-6%	-18%
Warmwasser Bedarf	-3%	-46%	9%	-22%
Kühlbedarf	-27%	-29%	-15%	22%

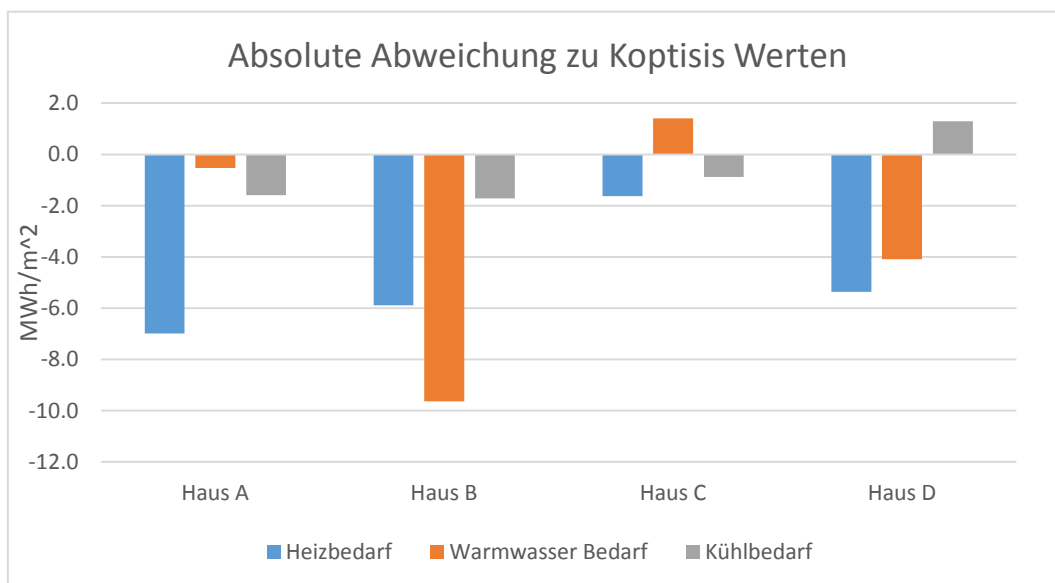


ABBILDUNG 13 ABSOLUTE ABWEICHUNG ZU KOPTISIS WERTEN

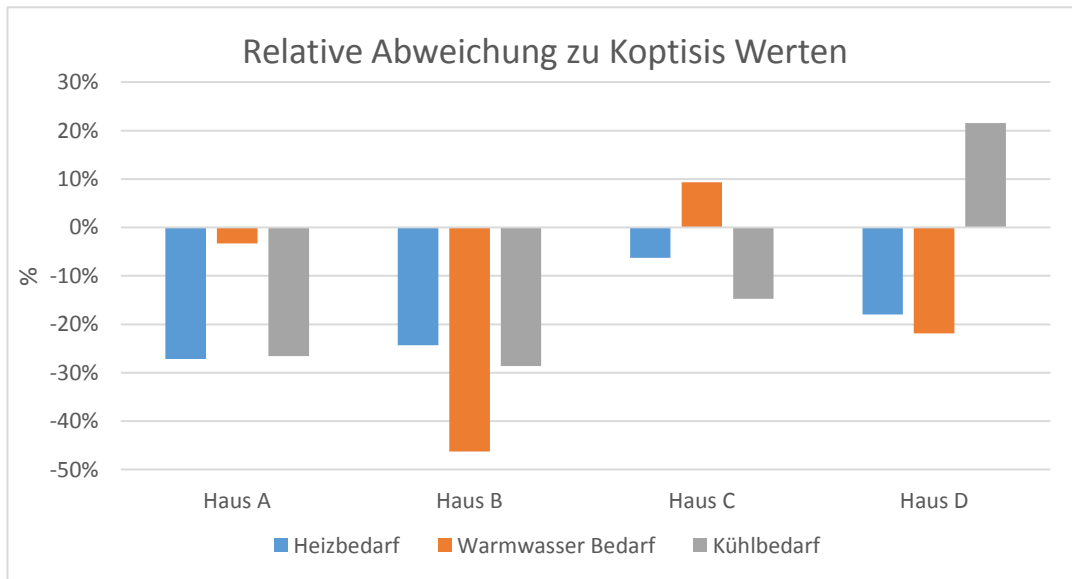


ABBILDUNG 14 RELATIVE ABWEICHUNG ZU KOPTISIS WERTEN

In einer weiteren Berechnung des Heizungsplaners wurden Bedarfswerte pro Wohnfläche und Energiebezugsfläche berechnet. Die Berechnungen des Heizungsplaners überschreiten für alle Häuser bis auf Haus GH den gemessenen Wärmebedarf.

Tabelle 7 Vergleich Messwerte zur Bedarfsrechnung nach Heizungsplaner

	SIA 380-1 /m ² EBF	Heizungsplaner /m ² EBF	Gemessen /m ² EBF
Haus A [kWh/a]	25.3	26.0	18.7
Haus B [kWh/a]	25.3	24.0	18.3
Haus C [kWh /a]	25.3	26.0	24.2
Haus D [kWh /a]	25.3	30.0	24.5
Haus EF [kWh /a]	25.3	26.0	24.1
Haus GH [kWh /a]	25.3	29.0	30.0

Im Folgenden beziehen sich Werte pro m² falls nicht explizit erwähnt auf die EBF des Gebäudes.

TABELLE 8 RH ZU BWW VERTEILUNG

	A	B	C	D
Anteil RH [%]	54%	62%	59%	63%
Anteil BWW [%]	46%	38%	41%	37%

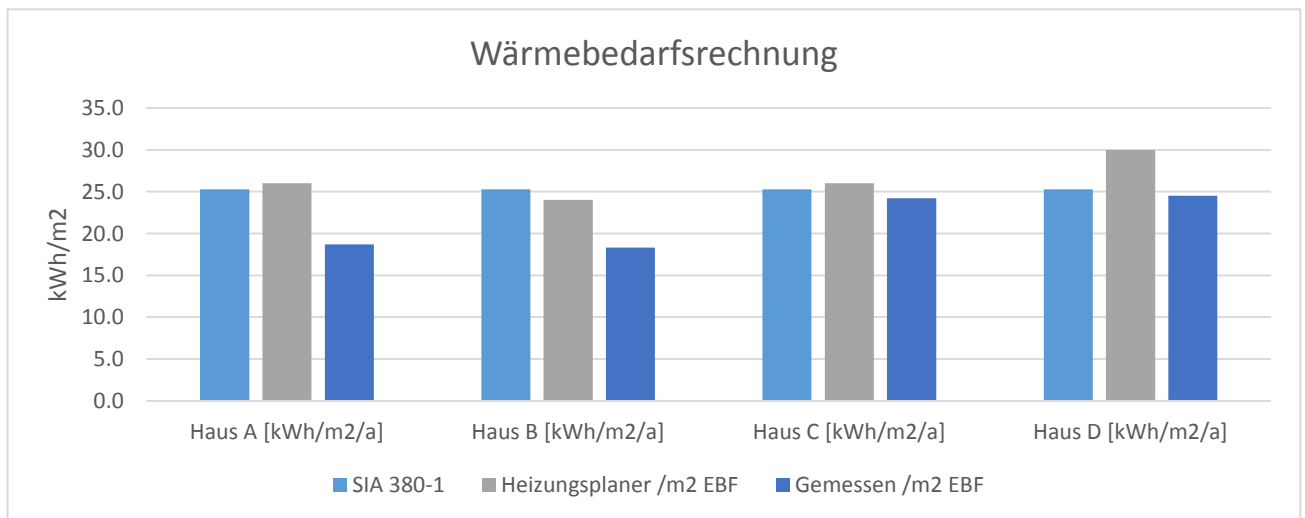


ABBILDUNG 15 WÄRMEBEDARFSRECHNUNG

In Tabelle 8 wird das Verhältnis zwischen Wärme für BWW und RH über ein Jahr für jedes Haus aufgezeigt. Die Extrema bilden Haus D mit einem Verhältnis von 63 % (RH) zu 37 % (BWW) sowie Haus A mit einem Verhältnis von 54 % (RH) zu 46 % (BWW).

Eine gute Referenz für die Verteilung zwischen BWW und RH ergibt sich aus der SIA Norm 380-1 für BWW (75 kWh/m²/a) und RH (91 kWh/m²/a). Es ergibt sich eine Verteilung des Wärmebedarfs von 55 % (RH) zu 45 % (BWW).

Die SIA 380-1 Norm entspricht mit einer maximalen Abweichung von 8 % den gemessenen Werten. Den Extremwert bildet Haus D, welches einen höheren Heizbedarf aufweist. Dieser ist eventuell auf die Witterungsregelung zurückzuführen. Grundsätzlich wurde der RH bedarf im Vergleich zu BWW durch die SIA Norm eher unterschätzt. Für Haus A entspricht die BWW- zu RH-Verteilung fast genau der SIA Norm.



Wärmebedarf bezogen auf Wohnungsspiegel

Im Zusammenhang zum BWW und RH Bedarf ist ein Vergleich der Häuser aufgrund ihres Wohnungsspiegels sinnvoll. Resultate werden in Tabelle 8 dargestellt.

Interessant zu bemerken ist das trotz gleichem Wohnungsspiegel in Häusern A und B ein deutlich erhöhter BWW-Bedarf in Haus A zu vermerken ist. Diese Differenz ist auf Nutzerverhalten zurückzuführen. Haus A weist zudem einen leicht tieferen RH-Bedarf pro EBF aus. Dies ist so nicht zu erwarten, da Haus A eine zusätzliche Aussenwand im Vergleich zu Haus B hat.

Haus C unterscheidet sich vom Referenzfall durch deutlich weniger Wohnungen und ein Zimmer mehr pro Wohnung im Durchschnitt. Dies macht sich durch einen deutlich höheren BWW- und RH-Verbrauch pro EBF bemerkbar. Die Begründung hierfür könnte beispielsweise sein, dass grössere Wohnungen eher durch Familien bewohnt werden und somit mehr BWW pro EBF benötigen. Der erhöhte RH-Bedarf im Vergleich zum Referenzfall könnte daran liegen, dass in Haus B eine Kita im UG ist, welche nur zu Öffnungszeiten beheizt werden muss und somit pro Fläche einen tieferen RH-Bedarf hat.

In Haus D sind im Vergleich zu Haus B mehr kleinere Wohnungen verbaut. Auch in Haus D wird mehr BWW verbraucht als im Referenzfall, jedoch weniger als in den Häusern A oder C. Der RH-Verbrauch ist deutlich höher als in Haus B, was wahrscheinlich auf die Wetterregelungstechnologie zurückzuführen ist.

Tabelle 9 Vergleich RH und BWW der Häuser nach Wohnungsspiegel

	Haus A	Haus B	Haus C	Haus D
	CO ₂	Referenz	PVT-Regeneration	Witterungsregelung
RH Bedarf [MWh]	26.3	27.8	26.4	32.1
BWW Bedarf [MWh]	22.1	17.0	18.0	19.1
RH Bedarf [kWh/m² EBF]	18.7	18.3	24.2	24.5
BWW Bedarf [kWh/m² EBF]	15.7	11.2	16.5	14.6
Anzahl Wohnungen	8	8	5	11
Durchschnittliche Anzahl Zimmer pro Wohnung	3	3	4	2.6
Sonstiges	Kita	Kita	-	-

Ergebnisse zu den einzelnen Konzeptvarianten

4.3.1 Haus B (Tièchestrass 53): Basisvariante

Fragestellung 2, 3: COP, JAZ WP

Die JAZ des Sytems von Haus B zwischen August 2017 und August 2018 wurde auf 3.9 berechnet und ist somit höher als der erwartete Wert von 3.5 (Tabelle 2, Kapitel 3.2). Wird nur die vom Kompressor verbrauchte Energie betrachtet, ist die Jahresarbeitszahl 4.7. Das System der Hilfsbetriebe der Wärmepumpe operiert bei einer Jahresarbeitszahl von 4.3.

Von März bis August ist die Tendenz der Arbeitszahl fallend, da mit steigender Aussentemperatur weniger geheizt wird und gleich viel Brauchwarmwasser produziert wird.

Dies führt zu einem verhältnismässigen Anstieg der BWW Produktion. Da der COP der Brauchwarmwasserproduktion tiefer als der COP für RH ist, sinkt die AZ. Ab September beginnt die AZ anzusteigen, da Aussentemperaturen wieder beginnen zu sinken und der RH Anteil steigt. Über die Wintermonate von November bis März bleibt die Arbeitszahl stabil.

Der COP der BWW-Produktion im Gleichgewichtszustand wurde auf 3.7 berechnet. Im Vergleich wird das Wasser für die RH im Gleichgewichtszustand mit einem durchschnittlichen COP von 5.8 produziert.

Es wurden 17 MWh BWW und 28 MWh RH produziert. Dies entspricht einer Verteilung von 38 % (BWW) zu 62% (RH).

Normiert auf eine Verteilung von 45 % : 55 % ergibt sich rechnerisch ein normierter COP des Systems von 4.9. Dieser Wert ist deutlich höher als die effektive JAZ, da nur Zustände im Gleichgewichtszustand analysiert werden. Übergangszustände (welche allgemein einen tiefen COP ausweisen) sowie elektrischer Bedarf für Regler und Pumpen wenn der Kompressor nicht läuft, können nicht in diese Rechnung miteinbezogen werden. Zusätzlich entfällt der Stromverbrauch für Zirkulationspumpen, welche auch dann Strom verbrauchen, wenn der Kompressor abgeschaltet ist.

TABELLE 10 RESULTATE HAUS B

Haus B		
JAZ (Gemessen)	Kompressor	4.7
	WP	4.3
	System	3.9
Normierter COP (Berechnet, GGW, 45 % (RH) zu 55% (BWW))	System	4.9
Mittlerer COP (Berechnet, GGW)	Total	5.1
	BWW	3.7
	RH	5.8
Wärme	BWW [MWh]	17.0
	RH [MWh]	27.8
	BWW [%]	38%
	RH [%]	62%

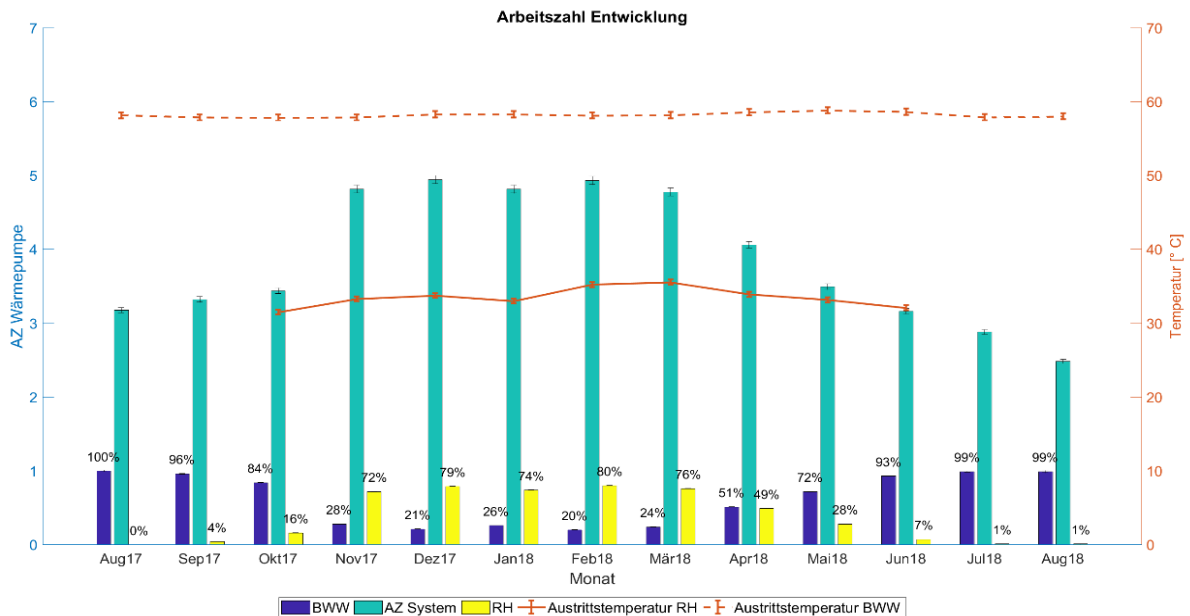


ABBILDUNG 16 ARBEITSZAHL ENTWICKLUNG

Fragestellung 4: Geocooling

In der Erdsonde von Haus B wird das Freecooling von Häusern B und C kombiniert.

In Haus B und C wurde jeweils 6.5 und 5.6 MWh Freecooling Energie gemessen. Auch die effektive Kühlenergie entspricht in etwa diesem Wert, mit 6.0 MWh für Haus B und 5.1 MWh für Haus C. Die Differenz der Werte stammt aus Verlusten in Komponenten und Leitungen.

In die Erdsonden von Haus B wurden in der Messperiode dementsprechend 12.1 MWh Energie durch Freecooling rekuperiert. Bei einer entzogenen Wärme von 35.7 MWh entspricht dies 33.8%. Dieser Wert entspricht dem Freecooling von 2 Häusern (B und C).

Fragestellung 9: Planung SIA vs. Ist:

Ein Vergleich zwischen erwarteten und effektiven Wärmebedarf zeigt, dass der Heizbedarf für RH und BWW in der Auslegung nach Heizungsplaner überschätzt wurden.

Betrachtungen sind nicht mit Heizgradtagen normiert.



TABELLE 11 WÄRMEBEDARFSRECHNUNG HAUS B

	Aug17	Sep17	Oct17	Nov17	Dec17	Jan18	Feb18
BWW Relativ	41%	38%	38%	42%	46%	47%	46%
BWW Absolut [kWh]	694	1295	1281	1426	1535	1602	1556
BWW Erwartet [kWh]	1686	3373	3373	3373	3373	3373	3373
RH Relativ	0%	0%	18%	58%	67%	50%	98%
RH Absolut [kWh]	0	55	242	3602	5618	4544	6317
RH Erwartet [kWh]	0	0	1367	6231	8441	9004	6472

	Mär18	Apr18	Mai18	Jun18	Jul18	Aug18	Summe
BWW Relativ	51%	44%	42%	39%	35%	28%	42%
BWW Absolut [kWh]	1707	1500	1409	1330	1178	475	17017
BWW Erwartet [kWh]	3373	3373	3373	3373	3373	1686	40475
RH Relativ	145%	95%	0%	0%	0%	0%	76%
RH Absolut [kWh]	5294	1447	540	95	9	6	26026
RH Erwartet [kWh]	3658	1527	0	0	0	0	36700

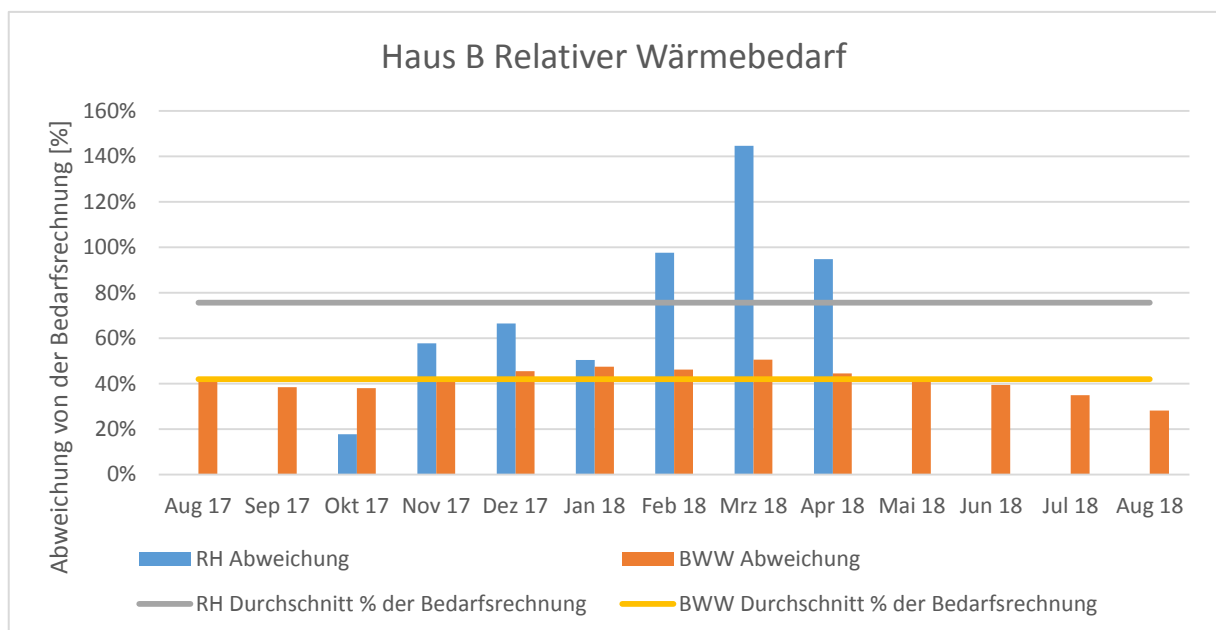


ABBILDUNG 17 HAUS B RELATIVER WÄRMEBEDARF

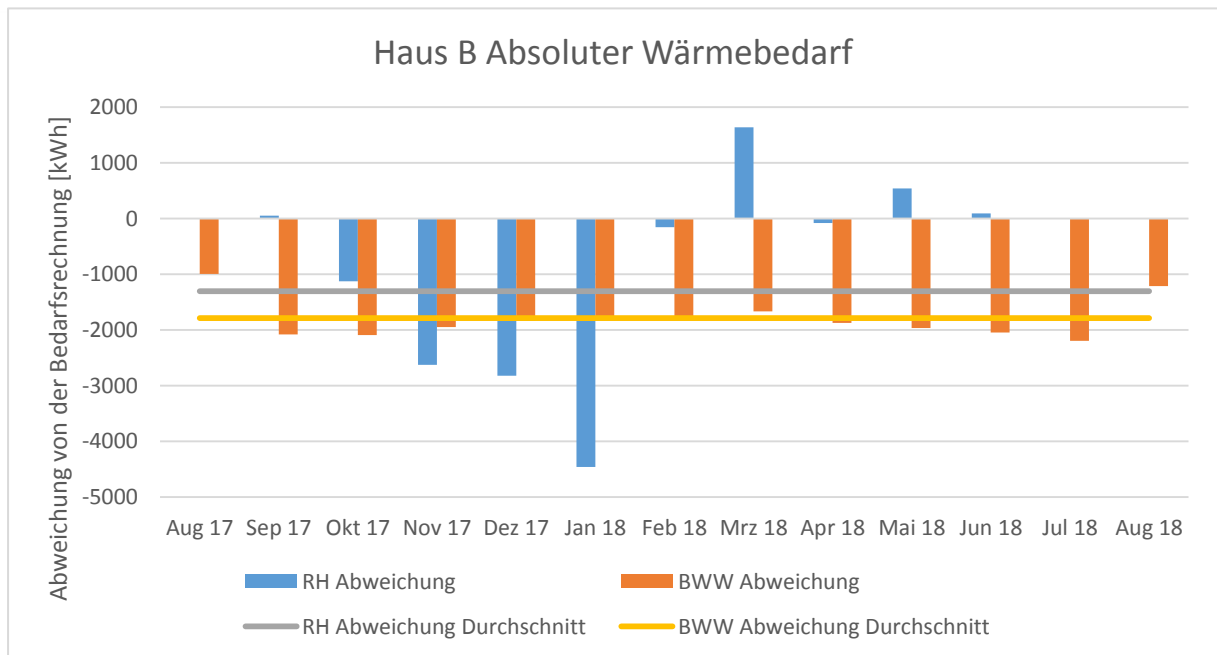


ABBILDUNG 18 HAUS B ABSOLUTER WÄRMEBEDARF

Haus A (Tièchestrasse 51): CO₂-Erdwärmesonde

Fragestellung 2, 3: COP, JAZ WP

Die Arbeitszahl des Systems von Haus A wurde im betrachteten Jahr auf 2.7 berechnet und ist somit deutlich tiefer als der erwartete Wert von 4 (Tabelle 2, Kapitel 3.2). Die Jahresarbeitszahl bezogen nur auf den Energiebedarf des Kompressors beträgt 3.5, für den Kompressor mit Hilfsbetrieben beträgt die JAZ 3.1.

Die Arbeitszahl zeigt über das Jahr die gleiche Tendenz wie das Referenzhaus B.

Der COP der BWV Produktion wurde auf 3.0 berechnet. Wasser für die RH wurde mit einem durchschnittlichen COP von 4.0 produziert.

Der normierte COP der Wärmepumpe beträgt 3.5. Da die RH zu BWV Verteilung fast genau der SIA Norm entspricht, ist dies nicht der Grund für den grossen Unterschied zwischen JAZ und normiertem COP, welcher nur Werte aus dem Gleichgewichtszustand betrachtet. Vielmehr weist diese Differenz auf einen hohen Energieverbrauch in Übergangszuständen und wenn der Kompressor abgeschaltet ist hin.

TABELLE 12 RESULTATE HAUS A

Haus A		
JAZ (Gemessen)	Kompressor	3.5
	WP	3.1
	System	2.7
Normierter COP (Berechnet, GGW, 45% (RH) zu 55% (BWW))	System	3.5
Mittlerer COP (Berechnet, GGW)	Total	3.4
	BWW	3.0
	RH	4.0
Wärme	BWW [MWh]	22.1
	RH [MWh]	26.3
	BWW [%]	46%

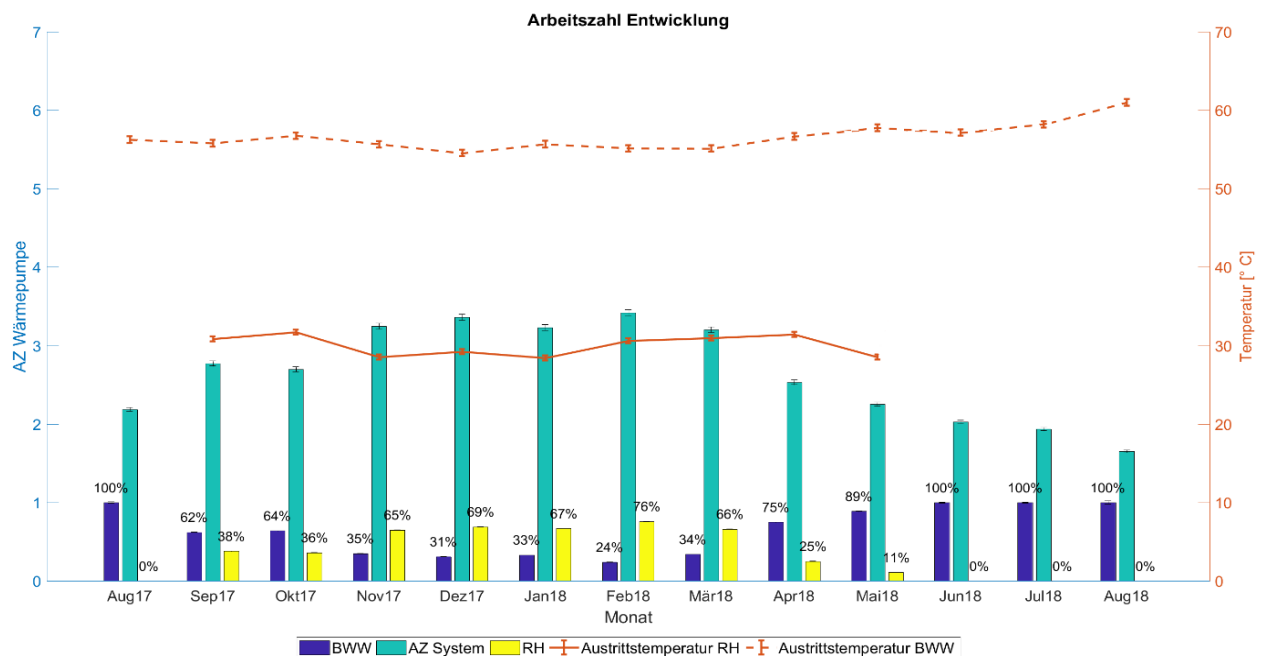


ABBILDUNG 19 ARBEITSZAHL ENTWICKLUNG

Es wurden 22.1 MWh BWW und 26.3 MWh RH produziert. Dies entspricht einer Verteilung von 46%:54%. Im Verhältnis wurde also 8% mehr BWW produziert als im Referenzhaus (38%:62% Verteilung). Der Heizbedarf für BWW war zudem (5 MWh, circa 25%) höher als im Referenzfall.

**Fragestellung 4: Geocooling**

Mit 6.2 MWh Freecooling Energie wurde hier etwas weniger gekühlt als in Haus B. Die effektive Kühlenergie ist mit 4.7 MWh tiefer als im Referenzfall.

In die Erdsonden von Haus A wurden in der Messperiode 6.2 MWh Energie durch Freecooling reku-periert. Bei einer entzogenen Wärme von 34.6 MWh entspricht dies 18 %.

Fragestellung 9: Planung SIA vs. Ist

Analog zum Referenzfall wurde für Haus A der Wärmebedarf für beide BWW und RH in der Ausle-gung des Heizungsplaners überschätzt. Die Schätzungen für BWW liegen jedoch näher am gemesse-nen Fall als für Haus B.

Betrachtungen sind nicht mit Heizgradtagen normiert.

TABELLE 13 WÄRMEBEDARFSRECHNUNG HAUS A

	Aug17	Sep17	Oct17	Nov17	Dec17	Jan18	Feb18
BWW Relativ	70%	69%	65%	73%	89%	80%	72%
BWW Absolut [kWh]	892	1759	1660	1879	2290	2052	1853
BWW Erwartet [kWh]	1281	2563	2563	2563	2563	2563	2563
RH Relativ	0%	0%	71%	55%	62%	46%	95%
RH Absolut [kWh]	0	1077	949	3400	5159	4086	6027
RH Erwartet [kWh]	0	0	1344	6129	8303	8857	6366

	Mär18	Apr18	Mai18	Jun18	Jul18	Aug18	Summe
BWW Relativ	95%	80%	70%	62%	53%	36%	72%
BWW Absolut [kWh]	2435	2055	1791	1589	1347	464	22066
BWW Erwartet [kWh]	2563	2563	2563	2563	2563	1281	30754
RH Relativ	130%	46%	0%	0%	0%	0%	73%
RH Absolut [kWh]	4679	688	218	0	0	0	26283
RH Erwartet [kWh]	3598	1503	0	0	0	0	36100

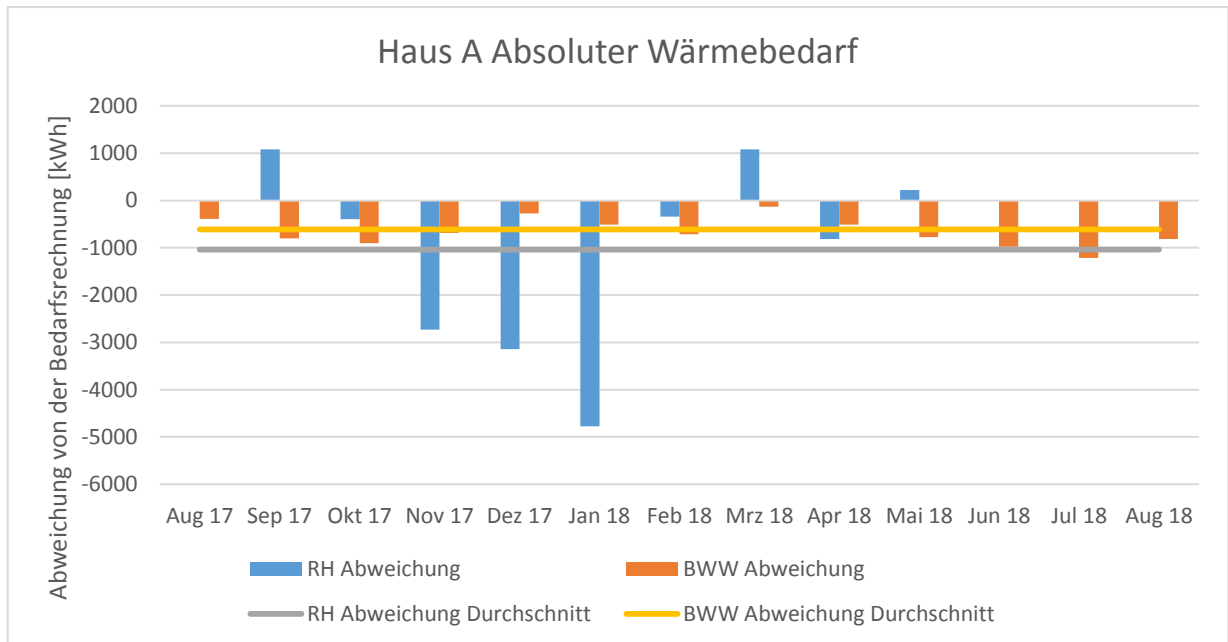


ABBILDUNG 20 HAUS A ABSOLUTER WÄRMEBEDARF

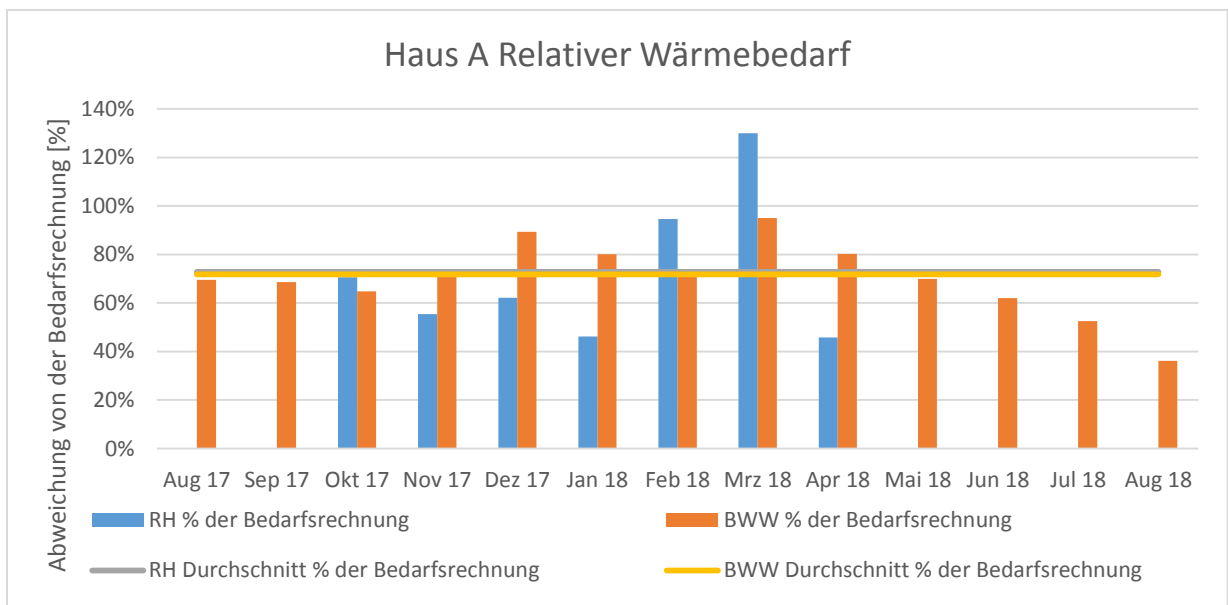


ABBILDUNG 21 HAUS A RELATIVER WÄRMEBEDARF

Fragestellung 12: Erfahrungen Einbau CO₂-EWS, Erfahrung Betrieb CO₂-EWS

Die bauseitigen Aushubarbeiten haben im Frühjahr 2015 gestartet. Im Juni 2015 wurden die drei CO₂-Erdsonden erstellt. Die 200 m tiefen Löcher wurden gebohrt und die Chromstahlwellrohr-Sonden darin abgeteufelt. Zusätzlich wurde mit jeder Sonde ein 100 m-Polyethylen-Geocooling-Rohr mit einge- zogen. Dieses Rohr dient dem Freecooling-Betrieb im Sommer.

Die Erfahrung aus dem Einbau des Chromstahlwellrohrs der CO₂-Sonde zeigt, dass dieser nicht mit dem Standardeinbauverfahren einer üblichen PE-Sonde zu vergleichen ist. Folgende Punkte sind auf- gefallen:

- Es ist aufwändiger, das Wellrohr beim Einbau in das Bohrloch abzutiefen, da es häufiger an der Bohrlochwandung anstösst sich kurzzeitig verkeilt, anschliessend wieder gelöst und so schritt- weise abgetieft werden muss.
- Das Rohr soll nahtlos von Sondenfuss bis Sondenkopf verlegt werden, um möglichst wenig Schwachstellen im Betrieb mit 50 bar Druck zu haben. Das bedeutet, dass die Bohrebene auf der Ebene des definitiven Schachtniveaus zu liegen hat, da die Sonde nach dem Bohren abgeschnit- ten werden muss, um das Bohrgestänge aus dem Bohrloch entfernen zu können. Eine Standard PE-Sonde kann jederzeit abgeschnitten und mit PE-Formstücken verlängert werden.
- Das Abschneiden der Sonde hat mit Spezialwerkzeug zu erfolgen, damit das Wellrohr anschlies- send mit den zugehörigen Verschraubungen am Sondenkopf angeschlossen werden kann. Das Sondenende ist nach dem Bohren dicht zu verschliessen und es ist darauf zu achten, dass keine Feuchtigkeit und keine Verunreinigungen in das Rohr gelangt, die später beim Füllen der Sonde mit CO₂ mühsam evakuiert und entfernt werden muss.
- Das Versetzen der Sondenschächte mit den Sondenköpfen ist mit den anderen Gewerken und den Baumeisterarbeiten zu koordinieren und insbesondere die Verrohrung von mehreren Schächten mit möglichst geraden Verbindungen zu planen, damit die relativ grosskalibrigen Käl- teleitungen fachgerecht verlegt werden können.

Die Planung und Bauleitung der Anlage erbrachten das Ingenieurbüro Weisskopf Partner GmbH.

4.3.2 Haus C (Tièchestrass 55): Solare Regeneration**Fragestellung 2, 3: COP/JAZ WP**

Die Jahresarbeitszahl des Systems von Haus C wurde auf 3.3 berechnet und ist somit tiefer als der erwartete Wert von 4 (Tabelle 2, Kapitel 3.2), und deutlich tiefer als im Referenzhaus.

Die Jahresarbeitszahl bezogen nur auf den Energieverbrauch des Kompressors beträgt 4.7 und liegt beim gleichem Wert wie im Haus B. Für den Kompressor inklusive Hilfsbetriebe beträgt die JAZ 4.1.

Da die JAZ des Systems deutlich geringer ist als im Referenzfall, jedoch die JAZ des Kompressors gleich, ist ersichtlich, dass das System ausserhalb der Wärmepumpe, d. h. für die übrigen Hilfsbetrie- be, deutlich mehr Energie verbraucht als im Referenzfall. Der PVT-Betrieb hat im Vergleich zum Refe- renzfall eine zusätzliche Umwälzpumpe installiert.

Wie bei den vorherigen Häusern ist die AZ zwischen Oktober und November steigend und von März bis Juni fallend. Die allgemein tiefe AZ ist auf einen erhöhten elektrischen Bedarf in der Kategorie «Übrige Hilfsmittel» zurückzuführen.

Der COP der BWB-Produktion wurde auf 4.2 berechnet und ist somit deutlich höher als im Referenz- fall. Dies ist eine direkte Folge der PVT-Regeneration des Bohrloches. Das Wasser für die RH mit ei-

nem durchschnittlichen COP von 5.2 produziert, etwas tiefer als im Referenzfall. Dies ist auf die zusätzliche Umwälzpumpe zurückzuführen.

Es wurden 18 MWh BWW und 26.4 MWh RH produziert. Dies entspricht einer Verteilung von 41 % (BWW) zu 59 % (RH).

Normiert auf eine Verteilung von 45 % (BWW) zu 55 % (RH) ergibt sich rechnerisch ein normierter COP von 4.7. Die grosse Differenz zwischen JAZ und normiertem COP ist ein Hinweis dafür, dass die zusätzlichen Hilfsbetriebe im Haus C in Übergangszuständen und auch wenn der Kompressor abgeschaltet ist einen sehr hohen Verbrauch aufweisen.

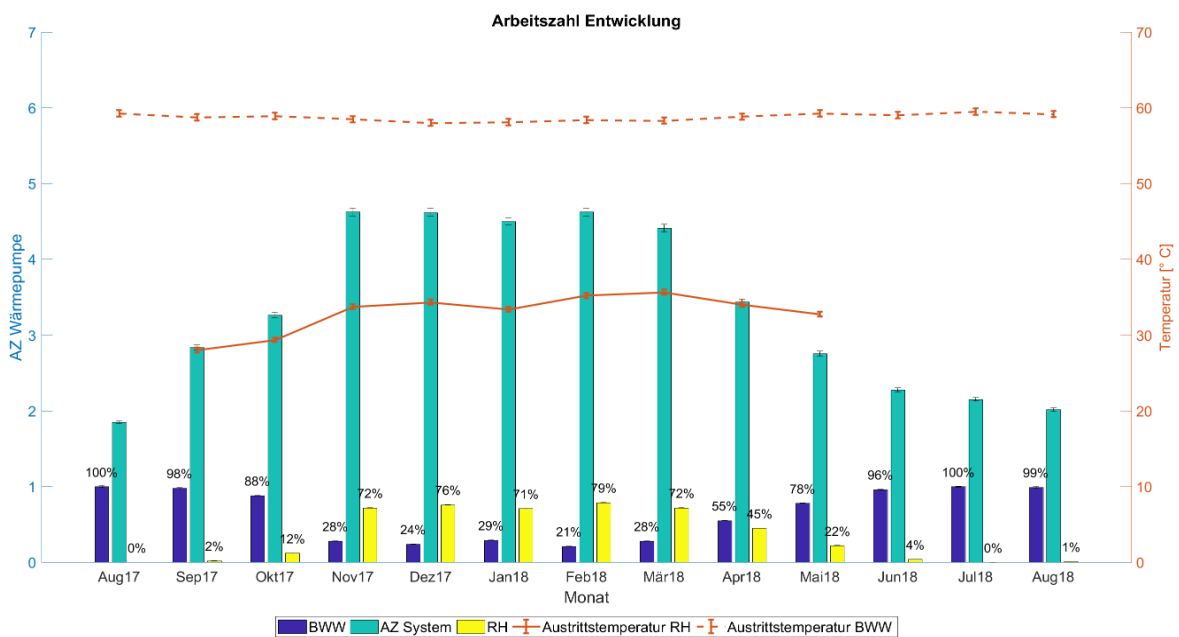


ABBILDUNG 22 ARBEITSZAHL ENTWICKLUNG



TABELLE 14 RESULTATE HAUS C

		Haus C
JAZ	Kompressor	4.7
	WP	4.1
	System	3.3
Normierter COP	System	4.7
Mittlerer COP	Total	4.8
	BWW	4.2
	RH	5.2
Wärme	BWW [MWh]	18.0
	RH [MWh]	26.4
	BWW [%]	41%
	RH [%]	59%

Fragestellung 5: Regeneration PVT

Das Haus C unterscheidet sich vom Referenzfall durch die PVT-Anlage.

Über die Messperiode wurden 36.4 MWh thermische Energie von den PVT-Kollektoren an das Bohrloch gegeben.

Von Haus C wurde mit 35.1 MWh ähnlich viel thermische Energie wie im Referenzfall entzogen. Es konnte über das Jahr 104 % der entzogenen Wärme rekuperiert werden.

Im Vergleich zu Haus B wurde ein elektrischer Mehraufwand der Pumpen von 1.3 MWh gemessen. Bei 36.4 MWh erzeugter thermischer Energie ergibt sich ein Verhältnis von 28 : 1.

Berechnungsmethode elektrischer Mehraufwand

Zur Berechnung des elektrischen Mehraufwandes wurden die Messwerte des Elektrozählers 'Hilfsbetriebe Wärmepumpe' sowie 'übrige Hilfsbetriebe' von Haus B und C jeweils flächenspezifisch berechnet. Die Differenz der Werte wurde mit der Hausfläche von Haus C multipliziert um einen Wert in kWh zu erhalten.

Dies gilt als Abschätzung, bis Pumpendaten mit den genauen Betriebszeiten ausgewertet werden können.

Mehraufwand Elektrisch PVT [kWh]

$$= \left(\text{Hilfsbetriebe WP} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]_{\text{Haus C}} - \text{Hilfsbetriebe WP} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]_{\text{Haus B}} + \text{Übrige Hilfsbetriebe} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]_{\text{Haus C}} - \text{Übrige Hilfsbetriebe} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]_{\text{Haus B}} \right) * \text{Fläche} [\text{m}^2]_{\text{Haus C}}$$

Eine Analyse der Entwicklung der Erdsonden-Temperatur über das gemessene Jahr zeigt für Haus C in den Monaten von August bis November 2017 und ab April 2018 eine erhöhte Erdsonden-Temperatur im Vergleich zu den Erdsonden von Haus A, B und D. In den Wintermonaten von November 2017 bis März 2018 nähern sich die Temperaturen der Häuser B bis D an, die Temperatur in Haus A fällt ab. In keinem der Häuser wurde ein Temperaturabfall über das Jahr gemessen. Die Temperatur in der Erdsonde zu Beginn Februar 2018 ist mit leichten Abweichungen gleich wie die Temperatur im März 2017. In allen Häusern findet Ende Februar 2018 ein starker Temperatureinbruch statt. Die ist auf extrem tiefe Aussentemperaturen von bis zu -10°C zu diesem Zeitpunkt zurückzuführen.

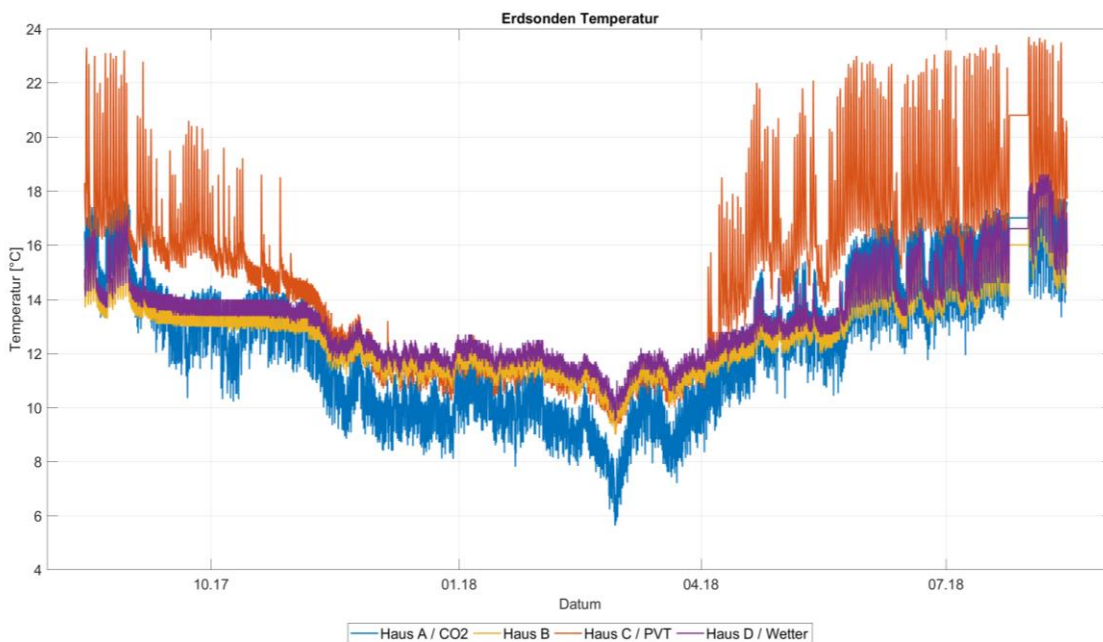


ABBILDUNG 23 ERDSONDEN TEMPERATUR

Die Temperatur der Erdsonde wird in zwei Bereiche aufgeteilt um eine genauere Analyse zu erlauben. Die warmen Monate ohne RH Bedarf werden von den Monaten mit RH bedarf abgetrennt (Tabelle 15). Hier zeigt sich deutlich die erhöhte Sonden Temperatur in Haus C in den Sommermonaten. Haus A hat die tiefste Sonden Temperatur im Winter. In Haus C macht sich vor allem im Sommer die PVT Regeneration mit einer sehr hohen Sonden-temperatur bemerkbar.



TABELLE 15 TEMPERATUR DER ERDSOSONDE

	Haus A	Haus B	Haus C	Haus D
Mittlere Sondentemperatur Okt-Apr [°C]	10.8	11.9	12.8	11.4
Mittlere Sondentemperatur Mai-Sep [°C]	15.1	14.3	18.0	14.4

Fragestellung 9: Planung SIA vs. Ist

Analog zum Referenzfall wurde für Haus C der Wärmebedarf für beide BWW und RH in der Auslegung des Heizungsplaners überschätzt, wobei der RH nur knapp überschätzt wurde. Die Schätzungen liegen jedoch näher am gemessenen Fall als für Haus B.

Betrachtungen sind nicht mit Heizgradtagen normiert.

TABELLE 16 WÄRMEBEDARFSRECHNUNG HAUS C

	Aug17	Sep17	Oct17	Nov17	Dec17	Jan18	Feb18
BWW Relativ	57%	53%	56%	64%	79%	79%	69%
BWW Absolut [kWh]	647	1201	1265	1438	1786	1775	1559
BWW Erwartet [kWh]	1126	2252	2252	2252	2252	2252	2252
RH Relativ	0%	0%	17%	75%	88%	63%	117%
RH Absolut [kWh]	0	28	179	3614	5720	4387	5842
RH Erwartet [kWh]	0	0	1050	4788	6486	6919	4973

	Mär18	Apr18	Mai18	Jun18	Jul18	Aug18	Summe
BWW Relativ	83%	73%	71%	60%	58%	50%	67%
BWW Absolut [kWh]	1859	1645	1594	1358	1316	558	18001
BWW Erwartet [kWh]	2252	2252	2252	2252	2252	1126	27020
RH Relativ	170%	117%	0%	0%	0%	0%	94%
RH Absolut [kWh]	4781	1371	440	55	6	3	26426
RH Erwartet [kWh]	2811	1174	0	0	0	0	28200

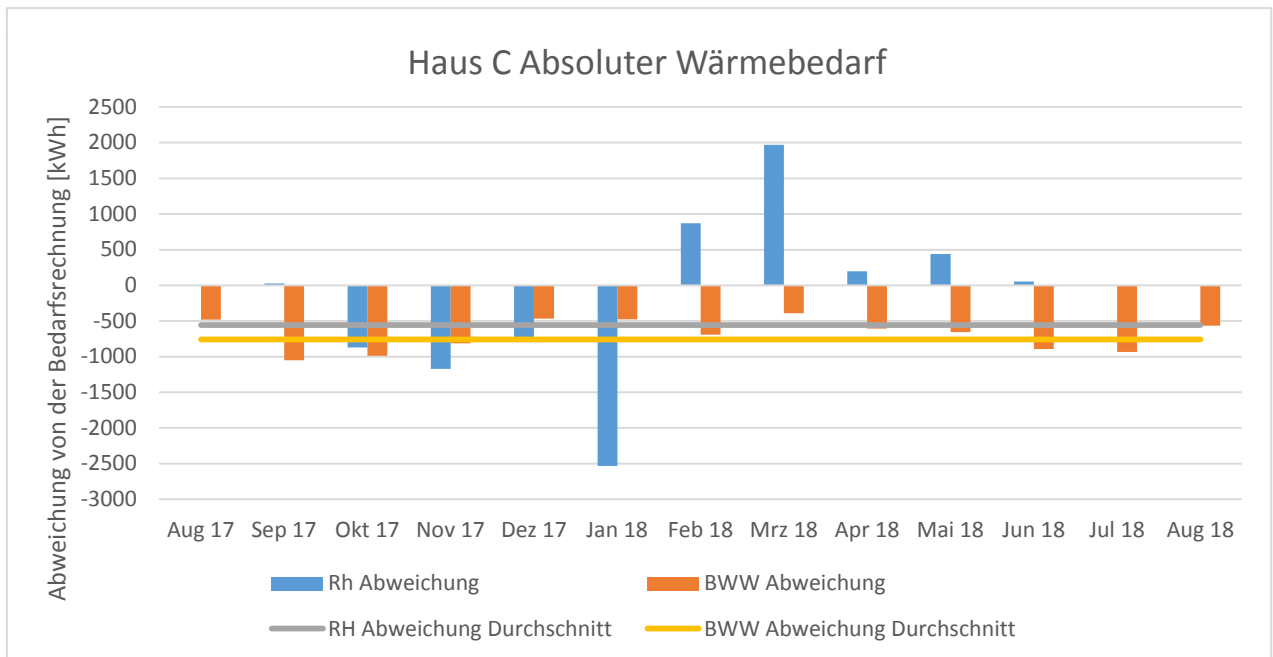


ABBILDUNG 24 HAUS C ABSOLUTER WÄRMEBEDARF

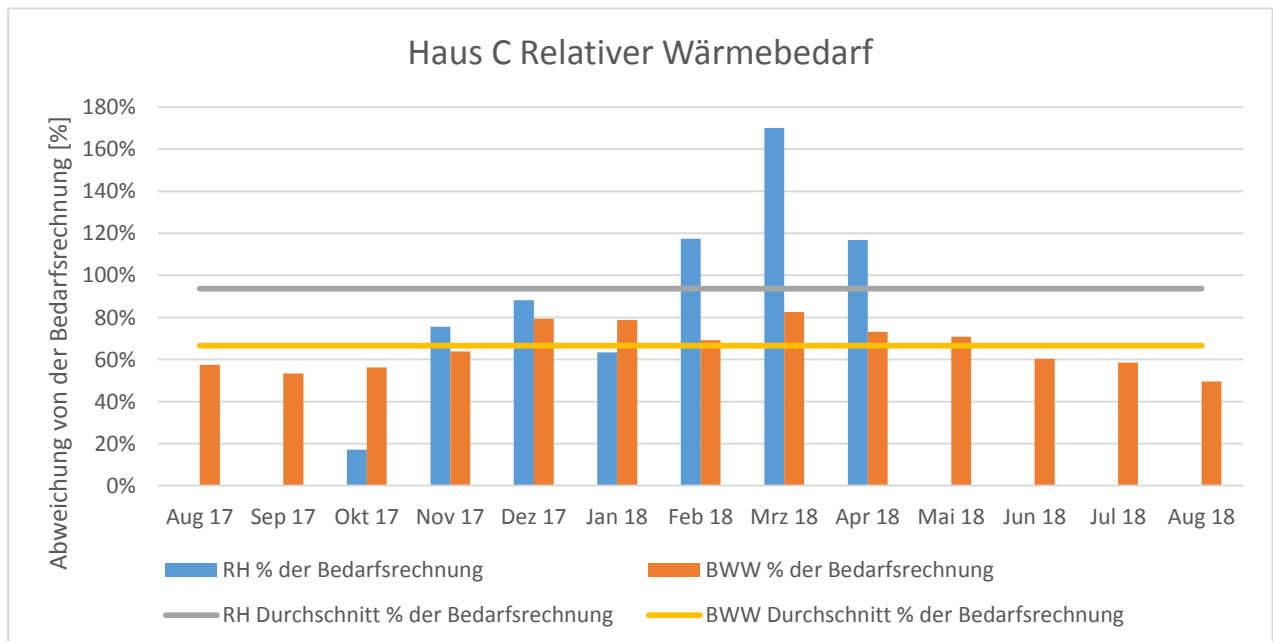


ABBILDUNG 25 HAUS C RELATIVER WÄRMEBEDARF

Haus D (Tièchestrasse 57): Witterungsgeführte Regelung mit Meteo-Daten

Fragestellung 2 + 3

Die Arbeitszahl des Systems in Haus D wurde auf 3.4 berechnet und ist somit in etwa gleich mit dem erwarteten Wert von 3.5 (Tabelle 2, Kapitel 3.2). Die JAZ bezogen nur auf die Energie des Kompressors beträgt 4.1, inklusive Hilfsbetriebe der Wärmepumpe beträgt die JAZ 3.7.



Der COP der BWW-Produktion liegt bei 3.2. Im Vergleich wird das Wasser für die RH mit einem hohen COP von 5.5 produziert. Die Differenz zwischen den Betriebszuständen ist damit etwas grösser als im Referenzfall. Diese Differenz war zu erwarten, da die Witterungsregelung nur einen Einfluss auf den Betriebszustand RH hat.

Es wurden 19.1 MWh BWW und 32.2 MWh RH in einem Verhältnis von 37 % (BWW) zu 63 % (RH) produziert.

Normiert auf eine Verteilung von 45 % (BWW) zu 55 % (RW) ergibt sich rechnerisch ein normierter COP von 3.7.

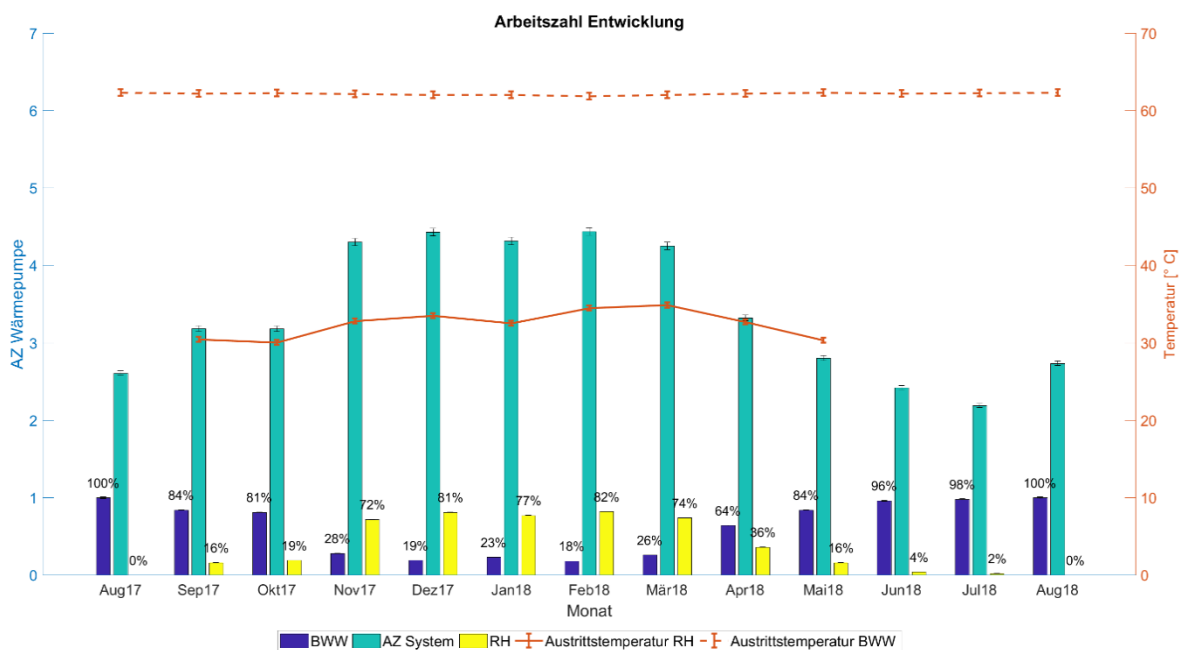


ABBILDUNG 26 ARBEITSZAHL ENTWICKLUNG



TABELLE 17 RESULTATE HAUS D

		Haus D
Wärme	Kompressor	4.1
	WP	3.7
	System	3.4
	Normierter COP System	4.6
	Mittlerer COP Total	4.6
	BWW	3.2
	RH	5.5
	BWW [MWh]	19.1
	RH [MWh]	32.2
	BWW [%]	37%
	RH [%]	63%

Fragestellung 4: Geocooling

Mit 9.6 MWh Freecooling Energie wurde deutlich mehr gekühlt als in den anderen Häusern. Auch die effektive Kühlenergie ist mit 8.1 MWh entsprechend höher.

In die Erdsonden von Haus D wurden in der Messperiode dementsprechend 9.6 MWh Energie durch Freecooling rekuperiert. Bei einer entzogenen Wärme von 39.5 MWh entspricht dies 24 %.

Fragestellung 9: Planung SIA vs. Ist

Analog zu den anderen Häusern der Wärmebedarf für beide BWW und RH durch die Auslegung des Heizungsplaners überschätzt.

Die Betrachtungen sind nicht mit Heizgradtagen normiert.

Fragestellung Optimierungsparameter

Es konnte nicht identifiziert werden, welche Parameter für die Witterungsregelung bestimmend sind.



TABELLE 18 WÄRMEBEDARFSRECHNUNG HAUS D

	Aug17	Sep17	Oct17	Nov17	Dec17	Jan18	Feb18
BWW Relativ	52%	48%	51%	56%	61%	60%	60%
BWW Absolut [kWh]	733	1366	1440	1598	1733	1719	1703
BWW Erwartet [kWh]	1421	2842	2842	2842	2842	2842	2842
RH Relativ	0%	0%	23%	61%	80%	60%	111%
RH Absolut [kWh]	0	251	338	4040	7181	5743	7665
RH Erwartet [kWh]	0	0	1460	6655	9016	9618	6913

	Mär18	Apr18	Mai18	Jun18	Jul18	Aug18	Summe
BWW Relativ	67%	63%	57%	53%	39%	63%	56%
BWW Absolut [kWh]	1908	1799	1633	1493	1096	895	19116
BWW Erwartet [kWh]	2842	2842	2842	2842	2842	1421	34104
RH Relativ	142%	62%	0%	0%	0%	0%	82%
RH Absolut [kWh]	5533	1016	319	56	22	0	32164
RH Erwartet [kWh]	3907	1632	0	0	0	0	39200

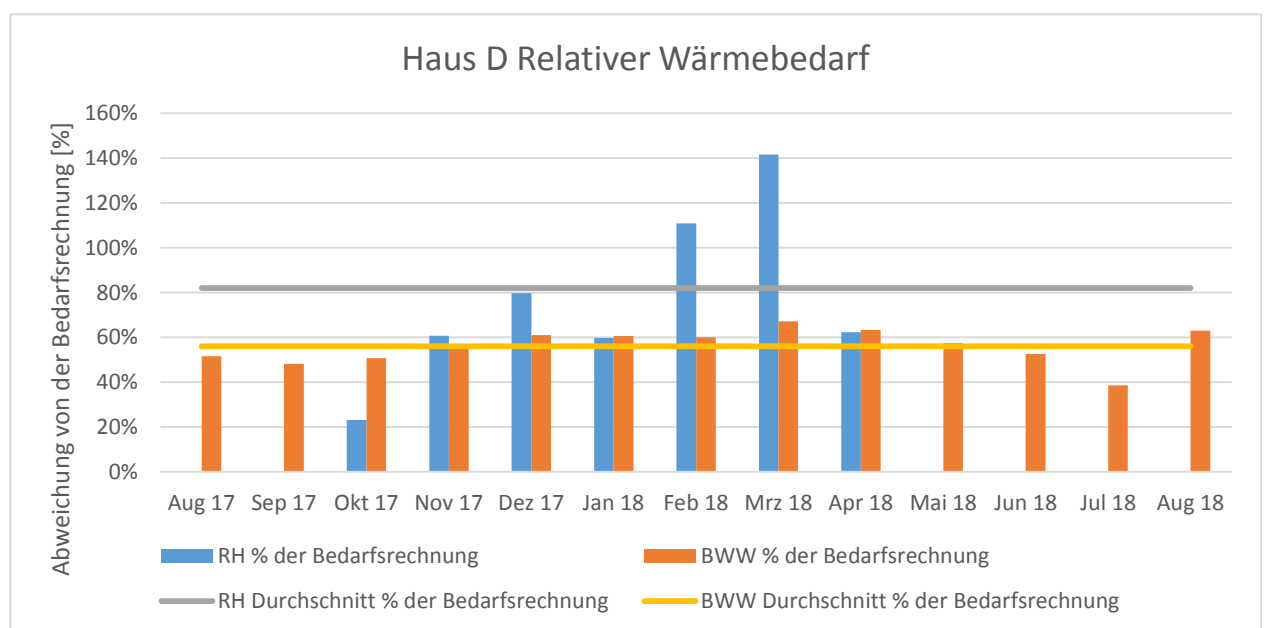


ABBILDUNG 27 HAUS D RELATIVER WÄRMEBEDARF

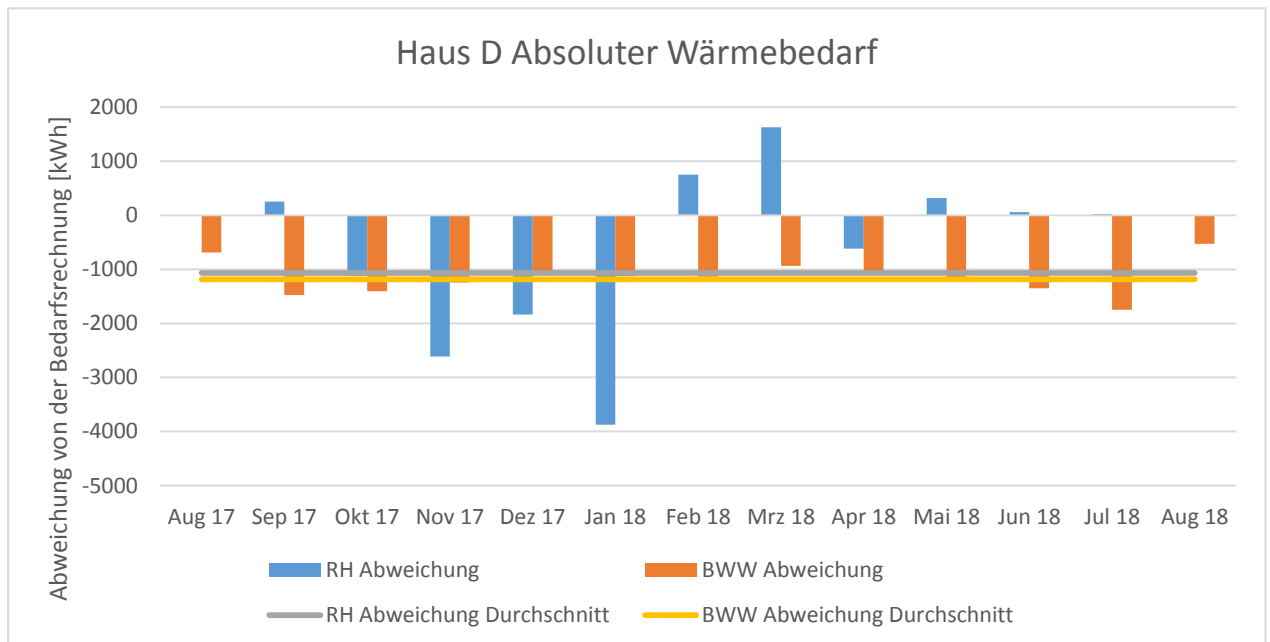


ABBILDUNG 29 HAUS D ABSOLUTER WÄRMEBEDARF

Vergleich der Konzepte

Im Folgenden werden die verschiedenen Konzepte der Häuser A-D anhand der Arbeitszahl, des COP im Gleichgewichtszustand für BWW- und RH-Betrieb, der total produzierten Wärme, der Verteilung der produzierten Wärme in BWW und RH, der Freecooling Energie, der Innenraumtemperatur sowie der rekuperierten Wärme der Erdsonden verglichen.

Werte, welche nicht berechnet werden konnten, werden in den Tabellen mit ‘-’ gekennzeichnet.

Fragestellung 2, 3: COP, JAZ WP

Haus A

Aus dem Vergleich der Resultate der verschiedenen Hauskonzepte ist das unerwartet schlechte Abschneiden der Wärmepumpe mit CO₂-Erdsonde von Haus A ersichtlich. In den Resultaten der Arbeitszahl, COP sowie der normierten Arbeitszahl schneidet Haus A unter den Erwartungen und schlechter als das Referenzhaus B ab.

Ein genaueres betrachten der Daten von Haus A und B zeigt, dass bei etwa 8 % mehr produzierter Wärme (48.3 MWh Haus A und 44.8 MWh Haus B), Haus A deutlich mehr (61 %) elektrische Energie verbraucht (17.1 MWh Haus A, 10.7 MWh Haus B).

Der Vergleich des elektrischen Verbrauches pro m² zeigt nicht einmal für Haus C einen noch höheren Verbrauch pro Wohnfläche. Wohnung C mit dem PVT-System hat eine Pumpe mehr im System als die übrigen Häuser. Auch Haus D hat bei deutlich mehr produzierter Wärme einen tieferen elektrischen Verbrauch als Haus A.



Tabelle 19 Elektrischer Verbrauch normiert auf EBF im Vergleich

	A	B	C	D
	CO ₂	Referenz	PVT-Regeneration	Witterungsregelung
Produzierte Wärme Total [kWh _{therm.}]	48340	44757	44427	51280
Kompressor Bedarf [kWh _{elekt.} / m ²]	9.8	5.9	8.6	8.9
Hilfsbetriebe WP Bedarf [kWh _{elekt.} / m ²] *	1.1	0.4	1.0	0.7
Andere Hilfsbetriebe Bedarf [kWh _{elekt.} / m ²] **	1.4	0.7	1.7	0.8
Total [kWh _{elekt.} / m ²]	12.2	7.0	11.3	10.5

* Beinhaltet den Strom für die Verdampfer- und Kondensatorpumpe der Wärmepumpe, entsprechend auch den Pumpenbetrieb des Erdsondenkreises für das Freecooling.

** Beinhaltet die weiteren Umwälzpumpen für die Heizverteilung die BWW-Erzeugung beim Haus C auch den Pumpenstrom für die thermische Solaranlage.

Haus C

Auch Haus C mit PVT-Regeneration zeigt eine JAZ unter dem Referenzwert von Haus B. Während die JAZ des Kompressors gleich hoch ist wie im Referenzfall, ist die JAZ der Wärmepumpe bereits unter dem Wert von Haus B. Dieser Wert befindet sich jedoch noch in einem akzeptablen Bereich. Auffällig ist die tiefe JAZ des Gesamtsystems von nur 3.3. Die PVT-Technologie macht sich durch einen erhöhten elektrischen Bedarf in der Kategorie «Andere Hilfsbetrieb» bemerkbar. Bei einer vergleichbaren produzierten Wärmemenge (44.8 MWh in Haus B, 44.4 in Haus C, 1 % Differenz), verbraucht Haus C deutlich mehr (+15 %) elektrische Energie. Der Grossteil des Mehrverbrauchs ist im Bereich der übrigen Hilfsbetriebe. Somit geht der Vorteil, welchen sich die PVT-Regeneration durch einen hohen COP der BWW-Produktion erarbeitet wieder verloren.

TABELLE 20 ELEKTRISCHER VERBRAUCH VON HAUS B UND C IM VERGLEICH

	Haus B	Haus C	Diff. [kWh/a]	Diff. [%]
Kompressor [kWh/a]	9016	9345	329	4%
Hilfsbetriebe Wärmepumpe *[kWh/a]	674	1056	382	57%
Übrige Hilfsbetriebe **[kWh/a]	998	1888	890	89%
Total [kWh/a]	10688	12289	1601	15%

* Beinhaltet den Strom für die Verdampfer- und Kondensatorpumpe der Wärmepumpe, entsprechend auch den Pumpenbetrieb des Erdsondenkreises für das Freecooling.

** Beinhaltet die weiteren Umwälzpumpen für die Heizverteilung die BWW-Erzeugung beim Haus C auch den Pumpenstrom für die thermische Solaranlage.

Zu erwarten gewesen wäre ein sehr hoher COP für die BWW-Produktion, da sehr hohe Temperaturen im Erdreich vor allem im Sommer für die BWW-Produktion gemessen wurden. Mit einem COP vom 4.2 war dieser Wert dann auch deutlich höher als im Referenzhaus B.

Eine genauere Betrachtung der Daten des mittleren COP der BWW-Produktion zeigt den Einfluss der hohen Regeneration im Haus C. Für Haus C ist dieser Wert in allen Monaten höher als im Referenzhaus B. In den Sommermonaten mit hoher Regeneration des Erdreiches steigen Werte weiter an. Dies liegt daran, dass die Temperatur in der Erdsonde direkt nach der Regeneration durch PVT sehr hoch ist und so einen hohen COP ermöglicht. Von September bis April wird weniger PVT Wärme regeneriert, der COP der BWW für Haus C sinkt hier merklich im Vergleich zu den Sommermonaten. Der Effekt des erhöhten COPs für BWW wird jedoch durch den zusätzlichen elektrischen Bedarf der Umwälzpumpe relativiert. In der JAZ des Systems schneidet Haus C unter Haus B ab.

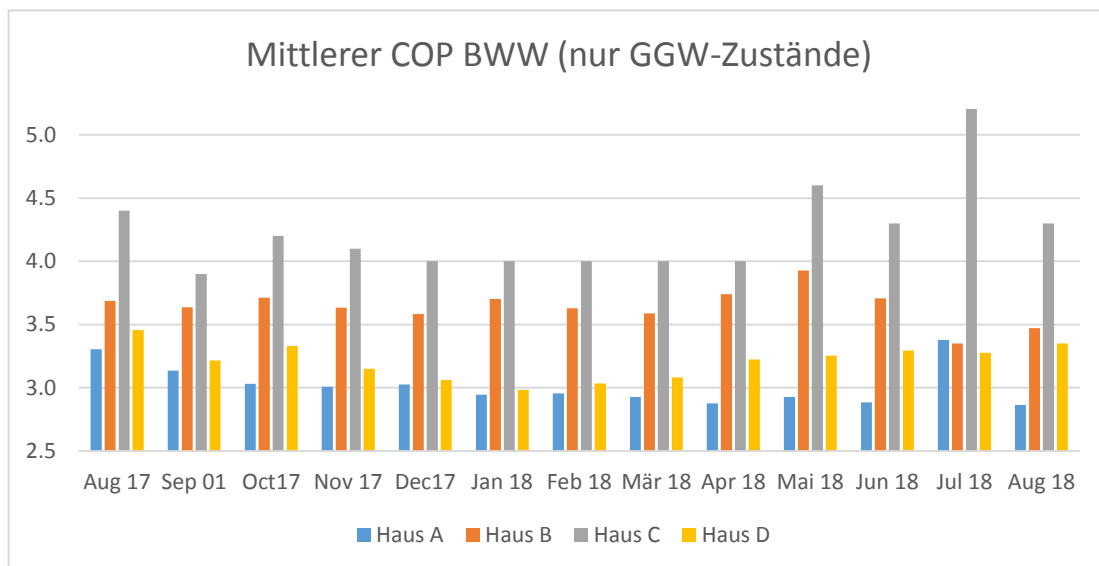


ABBILDUNG 30 MITTLERER COP BWW (NUR GGW-ZUSTÄNDE)

Eine grössere Abweichung der JAZ zwischen Haus B und C ist über mehrere Jahre zu erwarten, da durch die durch PVT erzeugte Wärme die Temperatur in der Erdsonde voraussichtlich besser regeneriert werden kann. Durch die langfristig höhere Temperatur in der Sonde ist ein über die Lebenszeit stabilerer COP zu erwarten.



TABELLE 21 COP BWW-PRODUKTION VERGLEICH

	Haus A	Haus B	Haus C	Haus D	
	CO ₂	Referenz	PVT- Regeneration	Witterungs- regelung	
Aug 17		3.3	3.7	4.4	3.5
Sep 17		3.1	3.6	3.9	3.2
Oct17		3.0	3.7	4.2	3.3
Nov 17		3.0	3.6	4.1	3.2
Dec17		3.0	3.6	4.0	3.1
Jan 18		2.9	3.7	4.0	3.0
Feb 18		3.0	3.6	4.0	3.0
Mär 18		2.9	3.6	4.0	3.1
Apr 18		2.9	3.7	4.0	3.2
Mai 18		2.9	3.9	4.6	3.3
Jun 18		2.9	3.7	4.3	3.3
Jul 18		3.4	3.3	5.3	3.3
Aug 18		2.9	3.5	4.3	3.4

Haus D

Haus D zeigt im Vergleich mit dem Referenzhaus B nur leichte Abweichungen. Auffällig ist ein relativ hoher COP im RH Betrieb, welcher jedoch unter dem Wert von Referenzhaus B bleibt. Durch die Witterungsregelungssoftware wäre ein hoher COP für RH zu erwarten. Da ab November 2017 in Haus D Sensoren keine Temperaturen im Innenraum aufzeichneten, könnte dies ein Anhaltspunkt für das mässige Abschneiden der Witterungsregelung sein.

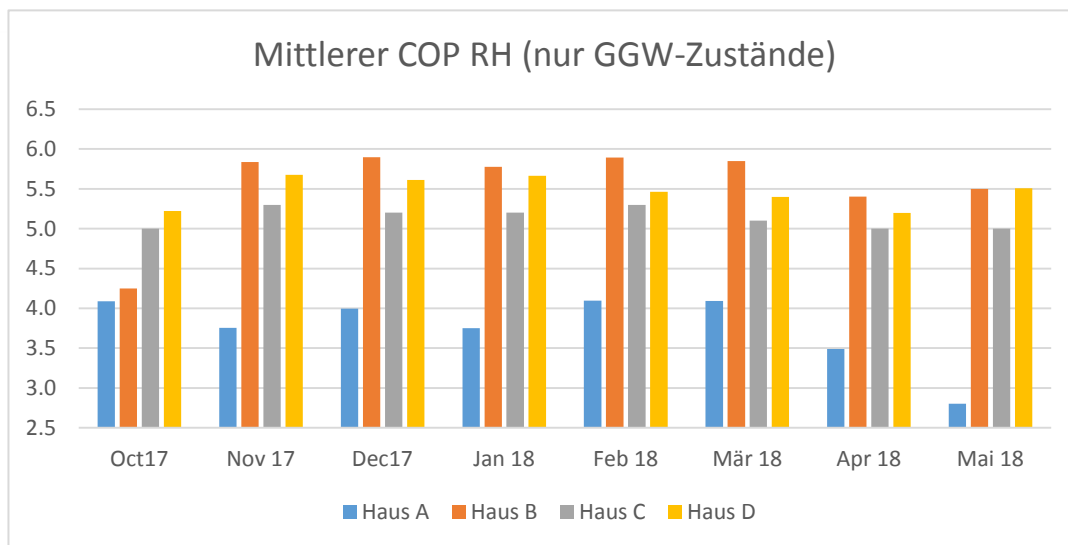


ABBILDUNG 31 MITTLERER COP BWB (NUR GGW-ZUSTÄNDE)

TABELLE 22 COP RH PRODUKTION VERGLEICH MITTLERER MONATSWERTE

	Haus A	Haus B	Haus C	Haus D
	CO ₂	Referenz	PVT-Regeneration	Witterungsregelung
Oct17	4.1	4.3	5.0	5.2
Nov 17	3.8	5.8	5.3	5.7
Dec17	4.0	5.9	5.2	5.6
Jan 18	3.7	5.8	5.2	5.7
Feb 18	4.1	5.9	5.3	5.5
Mär 18	4.1	5.9	5.1	5.4
Apr 18	3.5	5.4	5.0	5.2
Mai 18	2.8	5.5	5.0	5.5

Vergleich aller Häuser

Eine gute Basis für den Vergleich des Gleichgewichtszustandes der Systeme bietet der normierte COP der verschiedenen Systeme. Der Referenzfall von Haus B mit der gut etablierten Wärmepumpentechnologie schneidet am besten ab. Das CO₂-basierte System in Haus A hat einen deutlich tieferen normierten COP für BWB- und RH-Betrieb. Haus C zeigt durch die PVT-Regeneration eine hohe JAZ für den BWB-Betrieb auf, schneidet jedoch im RH-Betrieb schlechter ab. Das System mit Witterungsregelung in Haus D erreicht zwar gute Werte im Heizfall, bleibt aber dennoch hinter den Werten des Referenzfalls.

**TABELLE 23 NORMIERTER COP DER WÄRMEPUMPE NORMIERT AUF 55 % BWW ZU 45 % RH (SIA 380-1)**

	A	B	C	D
	CO₂	Referenz	PVT- Regeneration	Witterungs- regelung
Total	3.6	5.0	4.8	4.6
BWW	3.0	3.7	4.2	3.2
RH	4.0	5.8	5.2	5.5

Einen weiteren Vergleichspunkt liefert die produzierte Wärme in den verschiedenen Häusern. Die Häuser A und B bieten einen sehr ähnlichen RH Bedarf pro m². Haus C und D brauchen jeweils deutlich mehr Energie pro m² für den Heizbetrieb. Diese Differenz kann mit unterschiedlichem Benutzerverhalten erklärt werden, und mit der Kita im Untergeschoss von Haus A und B, welche nicht immer genutzt wird.

BWW wird in dieser Tabelle ebenfalls pro m² aufgeführt, da keine Information zu der genauen Anzahl Anwohner pro Haus bekannt ist. Die Wärmemenge für BWW in kWh/Person wäre ein besserer Vergleichswert.

Das Referenzhaus B weist von allen Häusern den tiefsten RH und BWW-Bedarf pro m² auf.

TABELLE 24 WÄRMEPRODUKTION NORMIERT AUF EBF UND VERTEILUNG

	A	B	C	D
RH Bedarf [kWh/m²]	18.7	18.3	24.2	24.5
BWW Bedarf [kWh/m²]	15.7	11.2	16.5	14.6
Kühlbedarf [kWh/m²]	4.4	4.3	5.1	7.3

Ein dritter Vergleich der Systeme erfolgt über die effektive Kühlleistung am Gebäude sowie des Regenerationspotentials der Erdsonden.

Auffällig ist die deutlich höhere Kühlenergie in Haus D im Vergleich zum Referenzhaus. Dies ist auf die Witterungsregelung zurückzuführen, welche durch vorrausschauende Regelung einen erhöhten Kühlbedarf verursacht. Dies könnte sich beispielsweise durch einen erhöhten Wohnungskomfort und eine höhere Regeneration und langfristig erhöhte AZ widerspiegeln.

TABELLE 25 EFFEKTIVES KÜHLEN

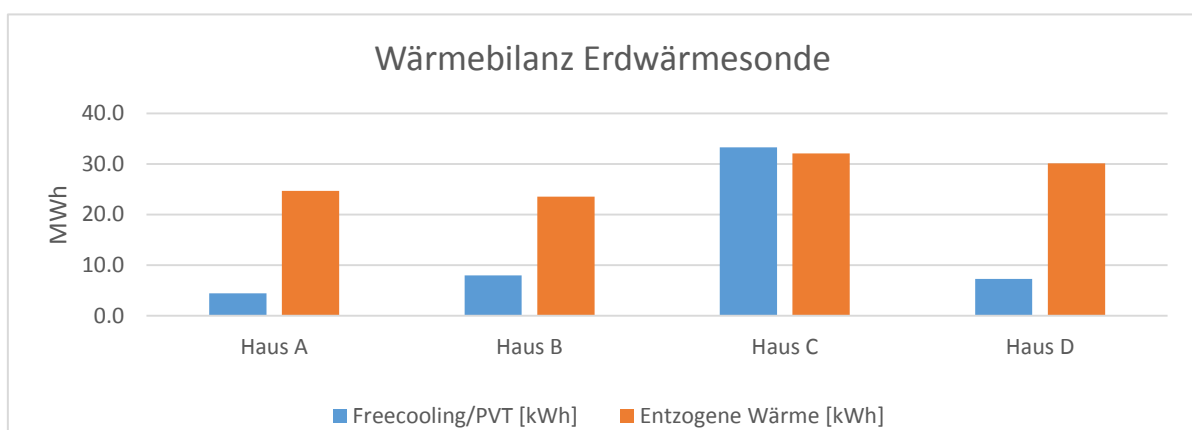
	A	B	C	D
Effektives Kühlen [kWh]	4652	5975	5092	8136

Ein wichtiger Parameter für die langfristige Betrachtung einer Wärmepumpe ist die Rückspeisung der Wärme in die Erdsonde. Ersichtlich ist die sehr hohe Rekuperation beim Haus C durch das PVT-System sowie eine erhöhte Menge an rekuperierter Wärme in Haus B durch das kombinierte Freecooling von Haus B und C. Haus D weist eine hohe rekuperierte Energie auf, da hier das Freecooling durch die Witterungsregelungstechnologie deutlich mehr genutzt wurde als in den anderen Häusern. Es wurde jedoch auch mehr Wärme entzogen. In Haus C kann die vollständige entzogene Wärmemenge rekuperiert werden.

Die entzogene Wärme pro Länge der Erdsonde ist für alle Häuser in etwa vergleichbar.

TABELLE 26 REGENERATION / WÄRMEBILANZ ERDSONDE

	A	B	C	D
	CO ₂	Referenz	PVT-Regeneration	Witterungsregelung
Freecooling/PVT [kWh]	6187	12090	36359	9567
Entzogene Wärme [kWh]	34640	35741	35082	39544
Entzogene Wärme pro Erdsonden Länge [kWh/m]	58	54	70	60
Differenz [kWh]	-28453	-23651	1277	-29977
% Regeneriert	18%	34%	104%	24%


ABBILDUNG 32 WÄRMEBILANZ ERDWÄRMESONDE

Innenraum-Temperatur

Eine weitere Erklärung für Unterschiede zwischen den Resultaten der Häuser könnte in Unterschieden in der Innenraumtemperatur der Wohnungen liegen. Ein näheres Betrachten der durchschnittlichen Innenraumtemperatur über die Messperiode zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Häusern. Nur in Häusern A und C waren Messdaten für das vollständige Jahr verfügbar. Von Sensoren aus Häusern B und D konnten ab Anfang Dezember 2017 kaum noch Daten aufgezeichnet werden. Dementsprechend sollten die Häuser B und D verglichen werden sowie die Häuser A und C.

Zu bemerken ist, dass einige Raumtemperatursensoren ungewöhnlich hohe Raumtemperaturen von bis zu 60°C anzeigen. Diese Sensoren wurden als fehlerhaft eingestuft, von der Durchschnittsrechnung ausgeschlossen, und nicht weiter betrachtet.

TABELLE 27 DURCHSCHNITTICHE INNENRAUMTEMPERATUR

	A	B	C	D
	CO ₂	Referenz	PVT-Regeneration	Witterungsregelung
Durchschnittliche Raumtemperatur [°C]	23.2	22.7	23.3	22.7

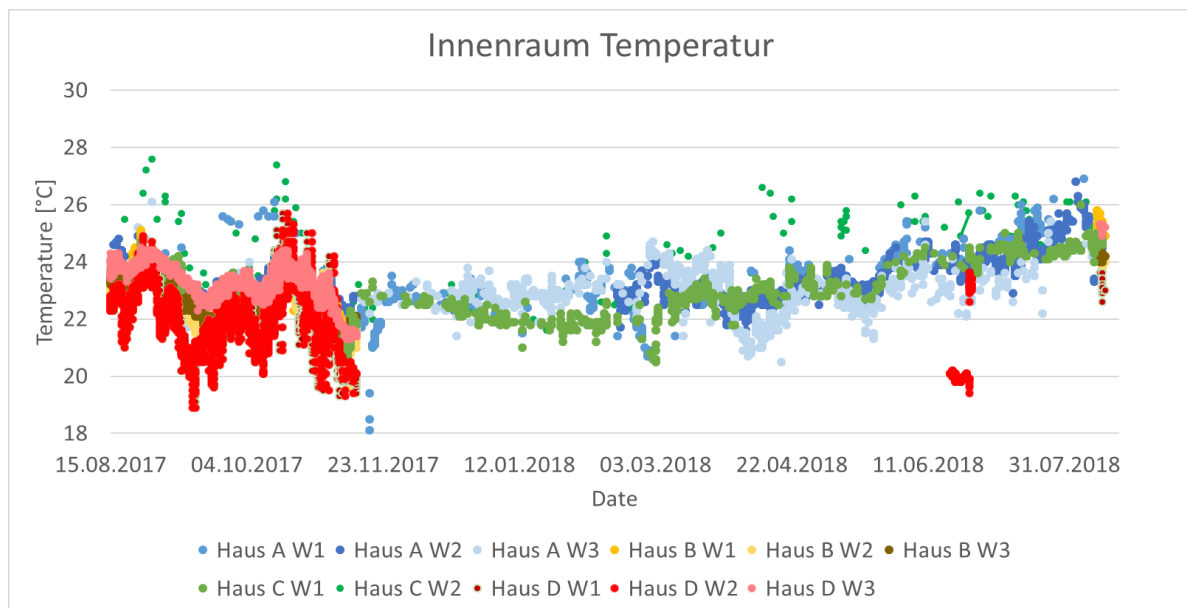


ABBILDUNG 33 INNENRAUM TEMPERATUR

Freecooling bei hohen Temperaturen

Im August 2018 gab es in eine Reihe von Tagen mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen. In Tabelle 28 werden die Höchsttemperaturen der Aussentemperatur, der Innentemperatur, der Sonden Temperatur, sowie des Freecoolings für jeden der Tage Ende Juli und Anfang August, an welchen über 30°C gemessen wurden ausgewertet. Die Innentemperatur wird für Haus A (repräsentativ für Haus B und C) und Haus D gezeigt. Da Haus D mit der Witterungsregelung ausgestattet ist, sind hier generell leicht tiefere Raumtemperaturen gemessen worden, welches auf erhöhten Komfort hin-

weist. In Haus A wurde in der heissen Woche bei einer Aussentemperatur von 36.6°C eine Innentemperatur von 26.8 Grad gemessen.

Bezüglich der Sondentemperatur konnte durch Freecooling eine Erwärmung des Erdreiches bis auf 18.5 Grad in Haus A gemessen werden. Als Vergleichspunkt konnte mit der PVT-Regeneration in Haus C eine Temperatur von bis zu 23.7°C erreicht werden.

Der Spitzenwert der Freecooling Leistung für ein Haus liegt bei 11 kW. Durch konstantes Freecooling in Tag und Nacht wird in den Häusern eine hohe Wärmemenge abgeführt. Die Freecooling Leistung flacht bei hohen Temperaturen nicht ab, und scheint mit der Ausnahme von wenigen Stunden und aussergewöhnlichen heissen Tagen eine Wohnungstemperatur von 25°C garantieren zu können.

TABELLE 28 EXTREMWERTE TEMPERATUREN UND FREECOOLING

Datum	Aussen- temperatur [°C]	Innen- temperatur HA [°C]	Innen- temperatur HD [°C]	Sonden- temperatur HA [°C]	Sonden- temperatur HC [°C]	Freecooling [kW]
31.07.2018	34.7	25.2	24.1	17.9	23.7	7.6
01.08.2018	36.1	25.7	25.1	17.9	23.4	9.0
02.08.2018	32.2	25.5	24.8	17.9	23.5	11.0
04.08.2018	36.6	26.8	25.4	18.2	23.6	8.9
05.08.2018	34.7	26.3	25.7	18.3	23.5	9.0
06.08.2018	35.5	26.0	24.9	18.5	23.6	9.6
07.08.2018	34.3	26.0	24.9	18.5	23.2	10.0
08.08.2018	30.9	25.6	24.7	18.2	23.1	11.0
09.08.2018	33.2	25.5	24.5	18.0	23.4	10.0
13.08.2018	31.5	24.9	23.6	17.6	20.7	10.0

Komponenten Betriebszeiten

Ein weiterer Vergleichspunkt für die Wärmepumpen der Häuser A bis D sind die Laufzeiten der Wärmepumpen und die Anzahl Wechsel zwischen Betriebszuständen. Deutlich bemerkbar macht sich die sehr hohe Laufzeit der Wärmepumpe in Haus A und eine sehr tiefe Laufzeit in Haus B. In Haus A zeigt sich neben der sehr hohen Laufzeit eine hohe Anzahl AN/AUS Wechsel der Wärmepumpe. Diese könnten Folgen einer schlechten Abstimmung zwischen CO₂-Sonde und Wärmepumpe sein.



TABELLE 29 KOMPONENTEN LAUFZEITEN

	A	B	C	D
	CO ₂	Referenz	PVT- Regeneration	Witterungs- regelung
Kompressor Laufzeit [h]	2459	1721	2024	2059
Anzahl AUS zu AN Kompressor	3626	2764	2474	2589
Anzahl Wechsel zu Freecooling	18	156	149	165

5. Diskussion

5.1 Allgemein

Haus A und Haus C zeigen eine tiefere Jahresarbeitszahl als erwartet. Haus B überschreitet die Erwartungen, Haus D zeigt die erwartete JAZ. In Haus B wurde über das Jahr gesehen die höchste Arbeitszahl gemessen, was dafür spricht, auf etablierte Technologien zu setzen.

Nach mehreren Jahren ist zu erwarten, dass die Arbeitszahl für Häuser A, B und D sinkt, da mehr Wärme entzogen als regeneriert wird.

5.2 Plausibilisierung der Daten

In den Berechnungen auf Basis der SIA Norm 380-1 wurde der Heizbedarf für Warmwasser und RH überschätzt. Der Kühlbedarf in den Sommermonaten wurde deutlich unterschätzt. Abweichungen von Schätzungen schwanken stark zwischen den verschiedenen Häusern.

Gleichermassen wurde der Wärmebedarf in der Berechnung nach Auslegung der Heizungsplaner der Wärmebedarf für alle Häuser überschätzt.

5.3 Diskussion zu den verschiedenen Konzepten

5.3.1 Haus B (Tièchestrass 53): Basisvariante

Haus B zeigt in den Messdaten eine höhere Arbeitszahl als erwartet. Zudem weist die Basisvariante von allen Häusern den tiefsten Wärmebedarf an BWW und RH pro m² auf. Auffällig ist zudem eine tiefe Laufzeit des Kompressors im Vergleich zu den anderen Häusern. Die Sonden in Haus B profitieren von doppeltem Freecooling von Häusern B und C.

5.3.2 Haus A (Tièchestrass 51): CO₂-Erdwärmesonde

Die niedrige Arbeitszahl von Haus A ist unerwartet. Die Wärmepumpe spart mit CO₂ als Wärmeträger die Verdampfer-Pumpe und hat so einen elektrischen Verbraucher weniger. Bei gleicher erzeugter Wärmemenge wurde dementsprechend eine tiefere elektrische Energie und somit eine höhere Arbeitszahl erwartet als im Vergleichsfall.

Eine Auswertung der Messdaten zeigt, dass für 8 % mehr totale produzierte Wärmemenge bei Haus A deutlich mehr elektrische Energie (+61 %) für alle Elemente aufgewendet wurde als für Haus B. Erstaunlich ist vor allem der deutliche Mehraufwand in der Kategorie 'Hilfsbetriebe Wärmepumpe', da hier im Vergleich zu Haus A eine Pumpe entfällt.

Der erhöhte Stromverbrauch der Hilfsbetriebe der Wärmepumpe und der übrigen Hilfsbetriebe ist primär auf die erhöhte Laufzeit (+42 %) der Wärmepumpe im Haus A zurückzuführen. Ein möglicher

Grund für den hohen Kompressor Bedarf könnten neben der hohen Laufzeit des Kompressors Wärme und Druckverluste in den langen Leitungen zwischen dem Wärmetauscher auf den Erdsonden und der Wärmepumpe sein.

Eine weitere mögliche Erklärung ist eine Abweichung im Verhältnis zwischen BWW- und RH-Produktion. In Haus A wurden 7 % mehr BWW produziert. Dies ist mit dem normierten COP ausgeglichen, ergibt jedoch nur eine Verbesserung von 3.5 (JAZ gemessen) auf 3.6 (normierter COP, berechnet).

TABELLE 30 PRODUZIERTE WÄRME PRO EBF

	A	B
RH [kWh/m²]	18.7	18.3
BWW [kWh/m²]	15.7	11.2

TABELLE 31 VERBRAUCHTE ELEKTRISCHE ENERGIE

	A	B
Kompressor [kWh]	13700	9016
Hilfsbetriebe Wärmepumpe [kWh]	1526	674
Andere Hilfsbetriebe [kWh]	1946	998
Summe [kWh]	17172	10688

Mitte Oktober 2017 wurde festgestellt, dass die Heizkurve für Haus A zu hoch eingestellt war. Es wurde eine Anpassung der Heizkurve vorgenommen. Des Weiteren wurden am 20.09 statische Expansionsventile im Kühlkreislauf durch elektrisch verstellbare Ventile ersetzt.

Um die Verbesserungen durch diese Umstellung abzuschätzen, werden der August 2017 (15.08.2017 - 31.08.2017) mit Aug 2018 (01.08.2018 – 15.08.2018) verglichen. Im Vergleich zwischen den Monaten ist keine Verbesserung zu vermerken. Die AZ des Systems sinkt trotz einer leicht höheren durchschnittlichen Bohrlochtemperatur. Ein Grund hierfür könnte die höhere durchschnittliche Austritts-temperatur für die BWW-Produktion sein.



TABELLE 32 VERGLEICH AUG 17 & AUG 18

	Aug17	Aug18
Kompressor Bedarf [kWh]	290	180
Hilfsbetriebe Wärmepumpe Bedarf [kWh]	64	52
Andere Hilfsbetriebe Bedarf [kWh]	71	96
Summe Bedarf Elektrisch [kWh]	425	328
BWW Wärme Produziert [kWh]	892	464
RH Wärme Produziert [kWh]	0	0
Summe Wärmebedarf [kWh]	892	464
% BWW Wärme	100%	100%
% RH Wärme	0%	0%
Bohrloch Temperatur [°C]	16.4	17.2
BWW Austritts-Temperatur [°C]	56.2	61
Kompressor Laufzeit	169	100
AZ Kompressor	3.2	3.0
AZ Wärmepumpe	2.6	2.3
AZ System	2.2	1.7

Da kein RH-Verbrauch in diesen Monaten vorliegt, wird ein weiterer Vergleich zwischen zwei Monaten vor und nach den Umstellungen durchgeführt.

TABELLE 33 VERGLEICH MÄRZ & NOVEMBER

	März	November	Januar
Kompressor Bedarf [kWh]	1411	1374	1636
Hilfsbetriebe Wärmepumpe Bedarf [kWh]	132	128	140
Andere Hilfsbetriebe Bedarf [kWh]	163	159	194
Summe Bedarf Elektrisch [kWh]	1706	1661	1970
BWW Wärme Produziert [kWh]	1912	1870	2092
RH Wärme Produziert [kWh]	3228	3400	4082
Summe Wärmebedarf [kWh]	5140	5270	6174
% BWW Wärme	37%	35%	34%
% RH Wärme	63%	65%	66%
Bohrloch Temperatur [°C]	10.9	11.6	10.4
RH Austritts-Temperatur [°C]	30.4	28.6	32.5
BWW Austritts-Temperatur [°C]	56.0	55.7	51.7
Gewichtete Austritts-Temperatur [°C]	39.9	38.2	39.0
Kompressor Laufzeit	1057	997	1173
AZ Kompressor	3.8	3.9	3.9
AZ Wärmepumpe	3.4	3.6	3.6
AZ System	3.1	3.3	3.2

Im Vergleich zum Monat März zeigt das System im November bei einer höheren produzierten Wärmemenge einen tieferen elektrischen Verbrauch von allen Komponenten. Die grösste Reduktion ist der Verbrauch des Kompressors. Der tiefere Verbrauch kann vor allem auf die etwas reduzierte Laufzeit des Kompressors und die leicht reduzierte durchschnittliche Austrittstemperatur zurückgeführt werden. Die reduzierte Austrittstemperatur scheint eine direkte Folge der abgesenkten Heizkurve zu sein, da die RH-Austrittstemperatur im Vergleich zum März fast 2°C tiefer ist. Es resultiert eine etwas erhöhte AZ von 3.6, welche weiterhin unter dem erwarteten Wert von 4 liegt.

Der Vergleich zwischen März und Januar zeigt eine ähnliche Tendenz. Bei deutlich mehr produzierter Wärme als im März gibt es einen relativ gesehen kleiner Anstieg im elektrischen Bedarf und in der gemessenen Laufzeit des Kompressors. Trotzdem bleibt die AZ unter dem erwarteten Wert von 4.

Fragestellung 12: Erfahrungen Einbau CO₂-EWS, Erfahrung Betrieb CO₂-EWS

Die Erfahrung aus dem Einbau des Chromstahlwellrohrs der CO₂-Sonde zeigt, dass dieser nicht mit dem Standardeinbauverfahren einer üblichen PE-Sonde zu vergleichen ist. Folgende Punkte sind aufgefallen:

- Es ist aufwändiger, das Wellrohr beim Einbau in das Bohrloch abzuteufen, da es häufiger an der Bohrlochwandung anstösst, sich kurzzeitig verkeilt, anschliessend wieder gelöst und so schrittweise abgeteuft werden muss.
- Das Rohr soll nahtlos von Sondenfuss bis Sondenkopf verlegt werden, um möglichst wenig Schwachstellen im Betrieb mit 50 bar Druck zu haben. Das bedeutet, dass die Bohrebene auf der Ebene des definitiven Schachtniveaus zu liegen hat, da die Sonde nach dem Bohren abgeschnitten werden muss, um das Bohrgestänge aus dem Bohrloch entfernen zu können. Eine Standard-PE-Sonde kann jederzeit abgeschnitten und mit PE-Formstücken verlängert werden.
- Das Abschneiden der Sonde hat mit Spezialwerkzeug zu erfolgen, damit das Wellrohr anschliessend mit den zugehörigen Verschraubungen am Sondenkopf angeschlossen werden kann. Das Sondenende ist nach dem Bohren dicht zu verschliessen und es ist darauf zu achten, dass keine Feuchtigkeit und keine Verunreinigungen in das Rohr gelangt, die später beim Füllen der Sonde mit CO₂ mühsam evakuiert und entfernt werden muss.
- Das Versetzen der Sondenschächte mit den Sondenköpfen ist mit den anderen Gewerken und den Baumeisterarbeiten zu koordinieren und insbesondere die Verrohrung von mehreren Schächten mit möglichst geraden Verbindungen zu planen, damit die relativ grosskalibrigen Kälteleitungen fachgerecht verlegt werden können.

5.3.3 Haus C (Tièchestrass 55): Solare Regeneration

In Haus C wird für den Kompressor und die Hilfsbetriebe der Wärmepumpe wie erwartet ein ähnliches Verhalten zu Haus B nachgewiesen. Über das ganze Jahr und besonders in den Sommermonaten ist ein sehr hoher COP der BWW zu vermerken, welcher direkt auf die hohen Temperaturen im Erdreich aufgrund der Einspeisung von PVT-Wärme zurückgeführt werden kann. Durch den elektrischen Mehraufwand der zusätzlichen Umwälzpumpe relativiert sich der positive Einfluss des hohen COPs für die BWW-Produktion über das Jahr und führt schlussendlich zu einer tieferen JAZ als im Referenzhaus.

Über das gemessene Jahr konnten 104 % der entzogenen Wärme regeneriert werden, welches der Auslegung entspricht.

5.3.4 Haus D (Tièchestrass 57): Witterungsgeführte Regelung mit Meteo-Daten

Durch die Software in Haus D kann durch einen passiven Mechanismus vorrausschauend geheizt und gekühlt werden. Die Technologie passt die normierte Aussentemperatur an und macht sich in den Messdaten unter anderem durch ein erhöhtes Freecooling bemerkbar. Dies führt zu einer erhöhten Regeneration pro Haus in der Erdsonde von Haus D (24 %, 1 Haus) im Vergleich zu Haus B (34 %, 2 Häuser).

Der Heizbedarf pro m² Wohnfläche wird durch die Witterungsregelung nicht verbessert. Im Gegenteil zeigt Haus D einen gegenüber dem Vergleichsobjekt erhöhten Heizbedarf pro m².

Im Oktober wurde ein hoher COP im RH-Betrieb relativ zum Referenzhaus erfasst. Dieser Effekt konnte in den folgenden Monaten nicht bestätigt werden. Dies könnte neben einer Reihe von nicht gemessenen Faktoren wie Nutzerverhalten auch auf die Witterungsregelung selbst zurückgeführt werden. Fehlerhafte Aufzeichnungen von Raumtemperaturen und fehlende Informationen von Sensoren

weisen darauf hin, dass das System zumindest im Rauminnen nicht funktioniert wie geplant. Ab November wurden in Haus D keine Raumtemperaturen aufgezeichnet. Zudem ist es möglich, dass der Algorithmus in bestimmten Wetterlagen besser funktioniert als in anderen. In sich ist der Algorithmus kein aktives System, es gibt keine lernfähige Komponente, es wird immer die gleiche Strategie verwendet. So ist es beispielsweise denkbar, dass bei sehr konstantem Wetter das System keinen Vorteil hat. In dieser Situation nimmt ein vorausschauendes System ähnliche Temperaturen an wie die reale Temperatur. Mit immer effizienteren regelungstechnischen Systemen wäre ein Vergleich eines passiven Reglers wie im System mit einem aktiven, lernfähigen Regler von Interesse.

5.4 Vergleichen der Konzepte

Weder Haus A mit CO₂ als Wärmeträger in der Erdwärmesonde noch Haus C mit PVT-Regeneration erreichen die erwarteten JAZ Werte. In Haus A ist auch nach Umstellung der Heizkurve zu Vertragswerten und einer Nachrüstung der Wärmepumpe die monatliche AZ unter dem erwarteten Wert von 4 geblieben. Die solare Regeneration durch PVT in Haus C ist an sich durch hohe Temperaturen im Erdreich im Sommer vielversprechend, verliert aber durch einen hohen Energieverbrauch der zusätzlichen Umwälzpumpe seinen Vorteil. Das Erdreich wird für dieses Haus vollständig regeneriert, welches langfristige Vorteile gegenüber den anderen Konzepten verspricht. Die Witterungsregelungstechnologie in Haus D konnte wegen Sensorstörungen weder einen Anstieg des COP der RH-Produktion noch einen tieferen Wärmedarf in der betrachteten Wohnung verursachen. Positiv bemerkbar war erhöhtes Freecooling und dadurch eine stärkere Regeneration des Erdreichs. Da keine genauere Information zur Funktionsweise der Witterungsregelung verfügbar ist, ist es nicht eindeutig, wieso sich der Anstieg im COP gegenüber des Referenzhauses B nach Oktober 2017 nicht bestand hatte. Da in diesen Monaten die Aufzeichnung der Innentemperaturen in Haus D Fehler zeigen, könnte dies eine Ursache sein.

Da PVT-Regeneration und die Witterungsregelungstechnologie sich gegenseitig nicht ausschliessen, und andere Betriebszustände beeinflussen, könnte eine Kombination der zwei Technologien von Interesse sein, falls der erhöhte COP der RH-Produktion für die Witterungsregelung bestätigt werden kann. Problematisch am PVT-System könnte das Wegfallen des Freecoolings sein, welches mit PVT-Regeneration nicht möglich ist.

Ein weiterer Anhaltspunkt für den Vergleich der Systeme ist eine Auswertung der Soll- und Ist-JAZ für jedes System. Hier fällt sofort auf, dass die Systeme in den Häusern A und C, für welche eine hohe JAZ prognostiziert wurde, nicht wie erwartet funktionierten. Das bewährte System in Haus B hingegen überschreitet Erwartungen, während das System in Haus D nur leicht unter dem erwarteten Wert liegt.

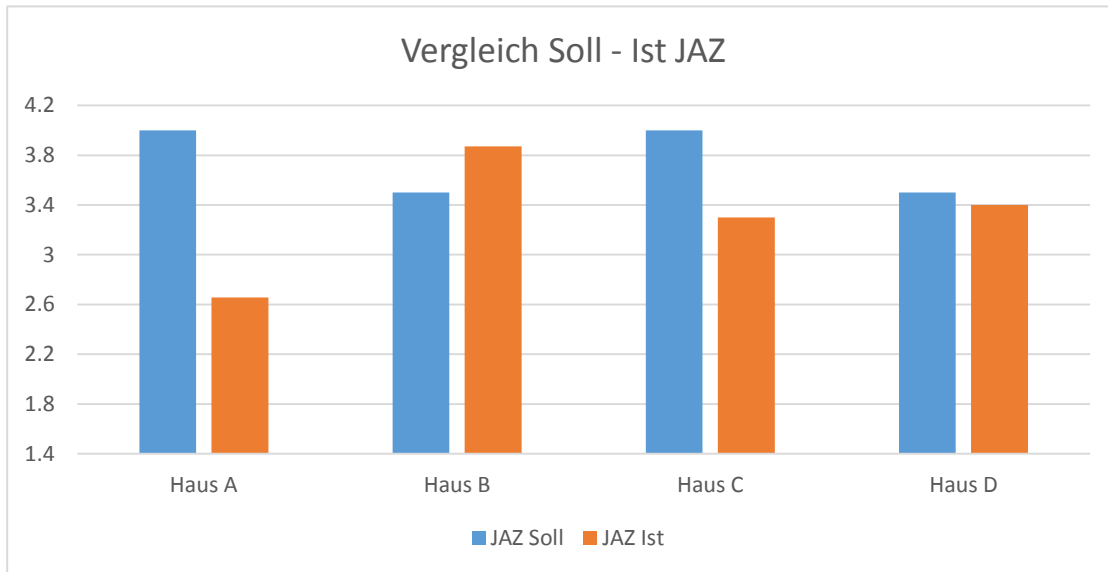


ABBILDUNG 34 VERGLEICH SOLL - IST JAZ

6. Schlussfolgerungen

Im betrachteten Messjahr zeigt das bewährte Konzept des Referenzhauses B die höchste JAZ. Auffällig sind tiefe Laufzeiten der Komponenten sowie ein tiefer Wärmebedarf pro EBF in diesem Gebäude. Hier könnte Nutzerverhalten das System ausschlaggebend beeinflusst haben. Kombinierte Regeneration der Erdsonden durch Freecooling von zwei Häusern (B und C) könnte einen leichten Einfluss auf das positive Ergebnis gehabt haben. Die durchschnittliche Temperatur der Erdsonde in Haus B ist nicht sonderlich hoch, dies sollte also nicht der Grund für das besonders gute Abschneiden des Systems sein.

Haus A mit CO₂ als Wärmeträger in den Erdsonden weist eine tiefe JAZ auf. Hohe Laufzeiten der Komponenten und ein unerwartet hoher elektrischer Verbrauch der Hilfsbetriebe könnten Hinweise auf die tiefe JAZ geben. Der hohe elektrische Verbrauch ist besonders unerwartet, da das System eine Pumpe weniger als der Referenzfall benötigt. Lange Leitungen zwischen Erdsonde und Kompressor sind ein möglicher Grund für diesen erhöhten Verbrauch. Zusätzlich ist eine tiefere Temperatur in der Erdsonde im Winter auffällig. Die Verdampfungstemperatur in den CO₂-Sonden ist theoretisch durch den Druck in der Sonde regelbar, in diesem Aufbau ist der Druck konstant eingestellt.

TABELLE 34 ÜBERSICHT DER WICHTIGSTEN KENNZAHLEN IM VERGLEICH

	CO ₂	Referenz	PVT-Regeneration	Witterungsregelung
JAZ System	2.7	3.9	3.3	3.4
Normierter COP System	3.5	4.9	4.7	4.5
RH [MWh]	26.3	27.8	26.4	32.2
BWW [MWh]	22.1	17.0	18.0	19.1
RH [kWh/m² EBF]	18.7	18.3	24.2	24.5
BWW [kWh/m² EBF]	15.7	11.2	16.5	14.6
Regeneration [%]	18%	34%	104%	24%
Kompressor Laufzeit vom Maximalwert der Häuser [%]	100%	70%	82%	84%
Mittlere Sondentemperatur Okt-Apr [°C]	10.8	11.9	12.8	11.4
Mittlere Sondentemperatur Mai-Sep [°C]	15.1	14.3	18.0	14.4

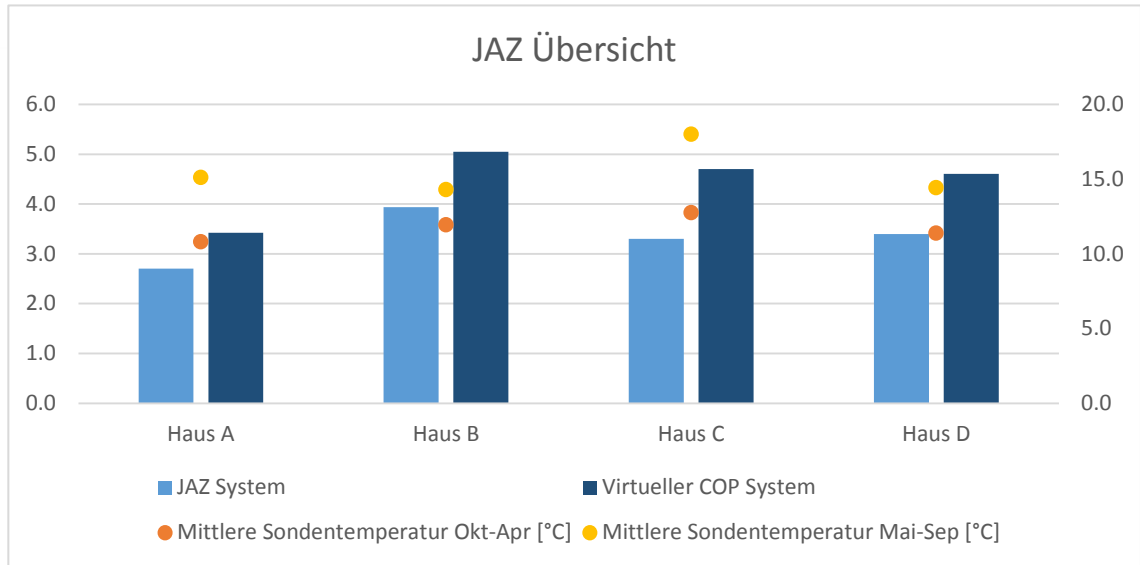


ABBILDUNG 35 JAZ ÜBERSICHT

In Haus C wurde die solare Regeneration der Erdsonden durch PVT Abwärme getestet. Der dadurch resultierende, sehr hohe COP für den BWW Betrieb besonders in den Sommermonaten wird jedoch durch den elektrischen Verbrauch der zusätzlichen Zirkulationspumpen relativiert. Eine vollständige Regeneration des Erdreiches wurde erreicht, welche langfristig zu einer stabilen JAZ führen könnte. Es ist jedoch auch zu bemerken, dass bereits mit Freecooling die Erdsonden in den übrigen Häusern über 20% regeneriert werden konnten. Zudem blieb die Bodentemperatur nach einem Messjahr in allen vier Bohrlöchern stabil.

Haus D wurde mit Witterungsregelungs-Software ausgestattet. Durch diesen Regelmechanismus zeigt Haus D höheres Freecooling und einen höheren Heizbedarf als das Referenzhaus. Ansonsten gibt es wenige Abweichungen zum Referenzfall. Dies könnte an den Sensorstörungen liegen.

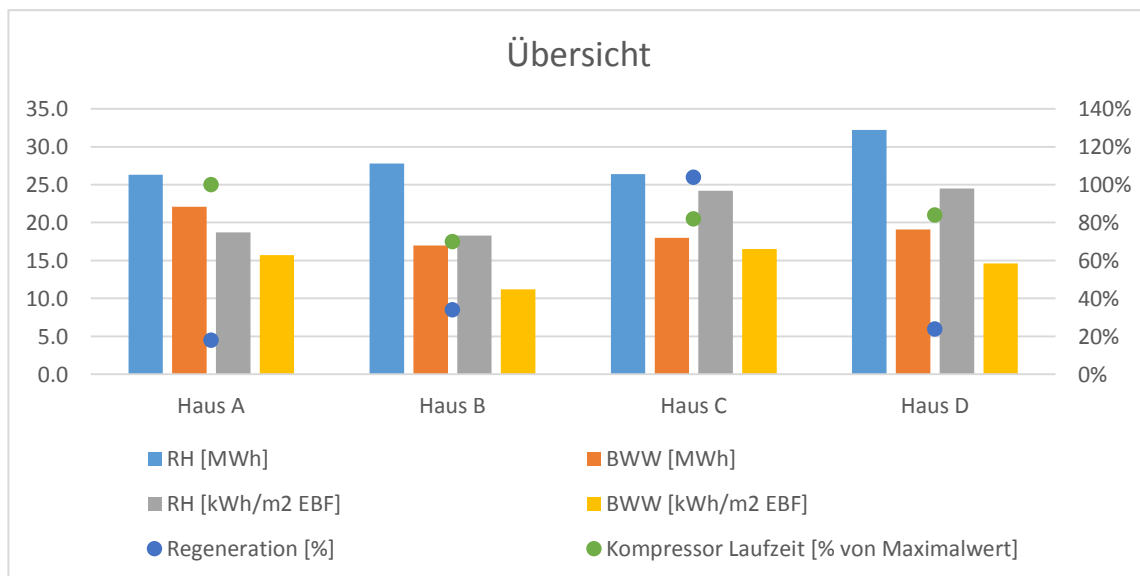


ABBILDUNG 36 ÜBERSICHT

Für den Betriebsfall Freecooling wurde bei der Auswertung der Messdaten festgestellt, dass teilweise bei tiefen Aussentemperaturen (circa 15°C) bereits Freecooling betrieben wird. Dies ist möglich, da die Freecooling Regulierung lediglich den über die vergangenen 24 Stunden gemittelten Temperaturwert betrachtet. Es ist also möglich, dass bei starken Wetteränderungen, wenn ein kühler Tag auf einen Warmen folgt, an dem kalten Tag zusätzlich gekühlt wird. Dies könnte zu tieferem Komfort der Anwohner führen.

Am Sinnvollsten wäre eine Kombination mit einem aktiven Regler um vorrausschauend kühlen zu können, oder zumindest ein zusätzlicher Schwellenwert der aktuellen Temperatur.

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit der Systeme könnte eine Umstellung von Wasser-Glykol Gemisch auf Wasser in den Sonden sein. Die tiefere Dichte des Wassers könnte zu signifikanten Einsparungen über die Lebenszeit durch Einsparungen in der Pumpenergie führen. Eine solche Umstellung bedarf einer grosszügigen Auslegung der Bohrlochlänge und eine Überwachung der Sonden Temperatur um gefrieren des Wassers zu vermeiden und im Notfall die Wärmepumpen abzuschalten. Da durch Freecooling das Erdreich zu circa 20% regeneriert wird, könnte dies jedoch ausreichen um die Umstellung von Glykol auf Wasser bei gleicher Bohrlochauslegung sicher zu gewährleisten.

Bei der Erstellung des dynamischen Modells ist eine möglichst vollständige Information über das System von sehr hoher Bedeutung. Hier hätte ein individueller Stromzähler für die Verdampfer- und Kondensatorpumpen sowie Messwerte für den Massenstrom in der Erdsonde die Arbeit vereinfacht und optimiert.

Die Resultate des Projektes Tièchestrasse waren die Grundlage für zwei Präsentationen an der '3rd International Conference On Smart Energy Systems And 4th Generation District Heating' in Kopenhagen im September 2017. Zwei Publikationen sind derzeit pendent für eine Spezialausgabe von *Energy*. Weiter wurde eine Masterarbeit (EPFL) und ein Semesterprojekt (ETHZ) über Modelle basierend auf dem Beispiel Tièchestrasse abgeschlossen.



7. Anhang

Name	Formel	Auswertungs-Δ	Bemerkung
Leistungszahl Kompressor	$COP_{Kompressor} = \frac{\Delta Q_{produziert}}{\Delta E_{Kompressor}}$	15 min	Nur Gleichgewichts-Zustände
Leistungszahl Wärmepumpe	$COP_{WP} = \frac{\Delta Q_{produziert}}{\Delta E_{WP}}$		
Leistungszahl System	$COP_{System} = \frac{\Delta Q_{produziert}}{\Delta E_{System}}$		
Jahresarbeitszahl Kompressor	$JAZ_{Kompressor} = \frac{\Delta Q_{produziert}}{\Delta E_{Kompressor}}$	1 Jahr	Messwerte
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe	$JAZ_{WP} = \frac{\Delta Q_{produziert}}{\Delta E_{WP}}$		
Jahresarbeitszahl System	$JAZ_{System} = \frac{\Delta Q_{produziert}}{\Delta E_{System}}$		
Energie Wärmepumpe	$\Delta E_{WP} = \Delta E_{Kompressor} + \Delta E_{Kompressor\ Pumpe} + \Delta E_{Evaporator\ Pumpe} + \Delta E_{WP\ Steuerung}$	15 min	
Energie System	$\Delta E_{System} = \Delta E_{WP} + \Delta E_{GWV\ Pumpe} + \Delta E_{RH\ Pumpe} + \Delta E_{Steuerung} + \Delta E_{Ventile}$		
PV Lastdeckungsfaktor	$LCF = \frac{\Delta PV_{Nutzbar}}{\Delta E_{Bedarf}}$	1 Monat	Vor Ort nutzbare PV Energie in Relation zum totalen Energieverbrauch. 1-LCF = Einkauf vom Netz
PV Versorgungs Abdeckfaktor	$SCF = \frac{\Delta PV_{Nutzbar}}{\Delta PV_{Produziert}}$		Vor Ort nutzbare PV Energie in Relation zur total produzierten Energie. 1-SCF = Verkauf ans Netz