



**Abschlussbericht** 21. April 2011

---

***Effizienz- und thermische  
Behaglichkeitsermittlung einer über den  
Fussboden wirkenden erdgekoppelten Heiz-  
und Kühlanlage für ein Gewerbehaus in  
Aarau (AG)***

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Geothermie  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

EBERHARD & Partner AG  
General Guisan-Strasse 2  
5000 Aarau  
[www.eberhard-partner.ch](http://www.eberhard-partner.ch)

**Autor(en):**

Dr. Oliver Sachs, [sachs@eberhard-partner.ch](mailto:sachs@eberhard-partner.ch)  
Dr. Mark Eberhard, [eberhard@eberhard-partner.ch](mailto:eberhard@eberhard-partner.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Gunter Siddiqi

**BFE-Programmleiter:** Rudolf Minder

**BFE-Vertrags- und Projektnummer (alt):**

154'408 bzw. 103'342

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

## **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>1</b>
<b>1. EINLEITUNG</b>	<b>2</b>
<b>2. AUFTRAG</b>	<b>4</b>
<b>3. STANDORT</b>	<b>4</b>
<b>4. GEOLOGIE / HYDROGEOLOGIE</b>	<b>4</b>
<b>5. GEOTHERMISCHES UMFELD</b>	<b>5</b>
<b>6. AUSGANGSLAGE UND AUSLEGUNGSDATEN</b>	<b>5</b>
<b>7. MESSKONZEPT / MESSINSTALLATION</b>	<b>7</b>
<b>8. MESSRESULTATE</b>	<b>9</b>
<b>9. AUSWERTUNG DER TEMPERATURMESSUNGEN</b>	<b>11</b>
<b>9.1 Raum- und Aussentemperaturen sowie Luftfeuchte im         Innenraum während der Heizphasen (Okt. – April)</b>	<b>12</b>
<b>9.2 Raum- und Aussentemperaturen sowie Luftfeuchte im         Innenraum während des Freecoolings (Mai bis Sept.)</b>	<b>13</b>
<b>9.3 Temperaturverhältnisse im Primärkreislauf während der         Heizphase (Okt. bis April)</b>	<b>14</b>
<b>9.4 Temperaturverhältnisse im Primärkreislauf während des         Freecoolings (Mai. bis Sept.)</b>	<b>15</b>
<b>10. ANALYSE DER TAUPUNKTPROBLEMATIK</b>	<b>16</b>
<b>11. BEHAGLICHKEITSANALYSE</b>	<b>19</b>
<b>11.1 Zeitliche Entwicklung des PMV-Index während der         Heizperiode (Okt. bis Apr.)</b>	<b>21</b>
<b>11.2 Zeitliche Entwicklung des PMV- und PPD-Index während         der Kühlperiode (Mai bis Sept.)</b>	<b>22</b>
<b>12. PUMPENLAUFZEITEN</b>	<b>24</b>
<b>13. PUMPENENERGIEN</b>	<b>26</b>
<b>14. EFFEKTIVER WÄRMEENTZUG AUS DEN SONDEN</b>	<b>27</b>
<b>15. EFFEKTIVER WÄRMEEINTRAG IN DIE SONDEN</b>	<b>28</b>
<b>16. JAHRESARBEITSZAHL (JAZ) UND LEISTUNGSZAHL (COP)</b>	<b>29</b>
<b>17. CO<sub>2</sub>-EINSPARUNG</b>	<b>31</b>
<b>18. SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>32</b>
<b>19. LITERATUR</b>	<b>32</b>
<b>20. BEILAGEN</b>	<b>34</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

An der General Guisan-Strasse 2 in Aarau wurde Ende 2008 eine geothermale Forschungsanlage in Betrieb genommen. Herzstück der Anlage sind drei je 225 m lange konventionelle Doppel-U-Erdwärmesonden aus Polyethylen. Die Erdwärmesonden (EWS) dienen zur Beheizung und Kühlung (Free-cooling, Geocooling) eines dreistöckigen, neu gebauten Bürogebäudes mit einer 1000 m<sup>2</sup> grossen Fussbodenheizung. Ganzjährig wird zusätzlich Brauchwarmwasser mittels der Erdwärme erzeugt. Messfühler in 225, 125 und 50 m Tiefe erfassen die *in situ* Temperaturen in den Sonden. Gleichzeitig wird permanent die Wärmemenge gemessen, welche dem Boden entzogen oder zugeführt wird. Von der gesamten Anlage werden alle 5 Minuten die wesentlichen Parameter vollautomatisch erfasst. Messparameter sind die Vor- und Rücklauftemperaturen der Erdsonden unmittelbar vor der Wärmepumpe und des Heizkreises nach der Wärmepumpe, die *in situ*-Erdsondtemperaturen in 50, 125 und 225 m Tiefe, die Boden-, Raum-, und Aussentemperaturen und die Laufzeiten aller im Heizsystem befindlichen Pumpen. Drei Wärmemessfühler messen im Winter die von den Sonden entnommene und während des Sommers die in die Sonden abgegebene Wärme. Insgesamt wurden 27 Parameter von Oktober 2008 bis März 2011 gemessen. Die Effizienz der Raumkühlung wurde stündlich ermittelt und monatliche, über die Heizperiode (HP) bzw. Kühlperiode (KP) reichende Auswertungen, mit der Bodentemperatur, der rel. Luftfeuchte und dem Taupunkt durchgeführt. Die vorliegende Studie erlaubt sowohl während der HP als auch während der KP eine kontinuierliche Bestimmung des Raumklimas. Hierfür wurde anhand der Messwerte im Referenzraum die thermische Umgebung analytisch bestimmt und durch die Berechnung des PMV-Indexes (**P**redicted **M**ean **V**oting, „erwartete mittlere Beurteilung“) sowie des PPD-Indexes (**P**redicted **P**ercentage **D**issatisfied, „Prozentsatz der mit dem Klima unzufriedenen“) das Raumklima normiert und gemäss der Schweizer Norm SN EN ISO 7730:2006 charakterisiert. Diese Vorgehensweise ergibt eine wertfreie Beurteilung des Raum- und Arbeitsklimas. Die Ergebnisse belegen, dass der Taupunkt zu keinem Zeitpunkt des über 2½ jährigen Beobachtungszeitraums erreicht wurde. Dasselbe gilt für den PMV-Index. Die Tagesmittel schwankten in der HP und KP immer im angestrebten Bereich zwischen -0.5 und +0.5 (0 entspricht dem idealen Wert). Damit belegt die Studie, dass das EWS-System von über 200 m Tiefe ebenso, wie weniger tiefe Sonden, sowohl zur effizienten Beheizung als auch zur Kühlung eines Bürogebäudes eingesetzt werden kann.

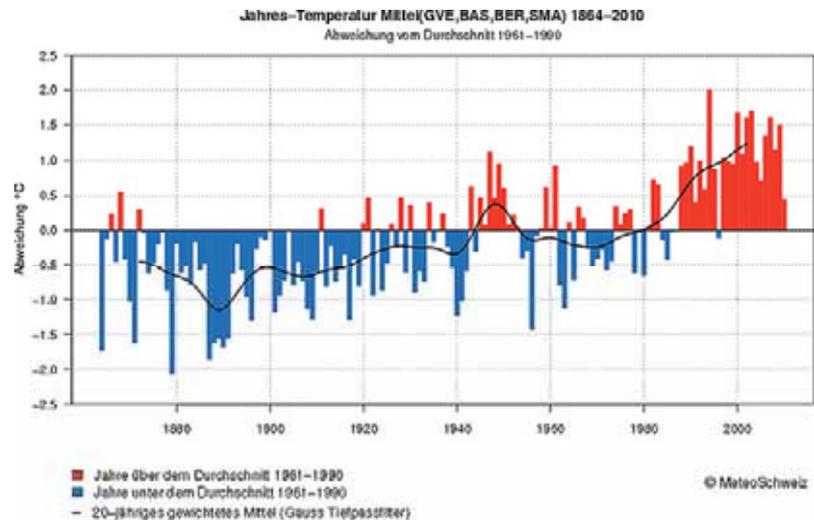
Von Dezember 2008 bis März 2011 wurden durch die Wärmepumpe 118'600 kWh Wärme ins Heizungssystem abgegeben, wobei 89'082 kWh (75 %) davon von den Erdwärmesonden stammen (Primärenergie). Der COP-Wert der Wärmepumpe variierte in diesem Zeitraum zwischen 3.2 und 5.2 (Werksangabe: 4.1). Während der Sommermonate (KP 2009 und 2010) wurden insgesamt 7591 kWh an überschüssiger Gebäudewärme in die Erdwärmesonden abgegeben. Die Kühlturbine benötigte hierfür 215 kWh elektrische Energie. Die in die EWS zurückgeführte Energie wurde vor allem zwischen 0 und 125 m zurückgegeben und diente der Regeneration des Sondenumfeldes. Die Wärmepumpe wurde während der KP 2009 mit den werksseitig vorgenommenen Einstellungen betrieben. Vor der KP 2010 wurden die Einstellungen optimiert und an das gut isolierte Gebäude angepasst. Durch die verbesserten Einstellungen wurden in der KP 2010 mehr als 200 kWh an elektrischer Energie für Wärmepumpe, Primärpumpe, Ladepumpe und Heizpumpe eingespart.

Die Messergebnisse belegen, dass in den Jahren 2009 und 2010 im Mittel etwa 45'700 kWh/a für Heizung und Brauchwarmwasser benötigt wurden. Für diese Energiemenge würden 4'503 l Heizöl pro Jahr benötigt. Durch diese Einsparung wird pro Jahr etwa 10 Tonnen weniger CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben.

## 1. EINLEITUNG

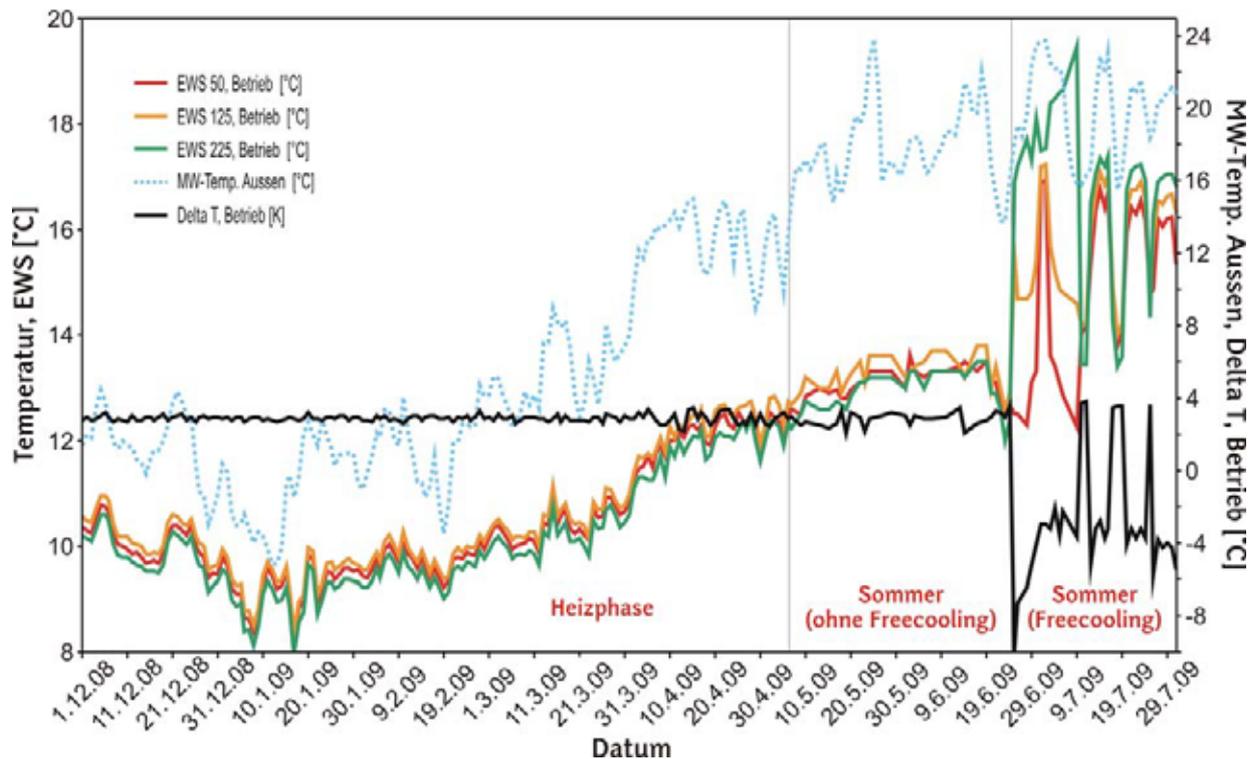
Erdwärmesonden (EWS) werden seit den 1970er Jahren für die Gewinnung von Wärmeenergie in privaten Haushalten, Bürogebäuden oder im öffentlichen Bereich (z. B. Bahnhofsgebäude, Verwaltungsgebäude) sehr erfolgreich eingesetzt. Seither erlebte diese Technologie eine rasante Entwicklung. Nach Angabe der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz bezogen 2009 von den 140'000 installierten Wärmepumpenanlagen etwa 65'000 ihre Energie über Erdwärmesonden (Sachs & Eberhard 2009).

In neuerer Zeit kommt zunehmend auch das Abführen bzw. aktive Kühlen mittels EWS zum Einsatz. Ein wichtiger Grund ist die zunehmende globale Temperaturerwärmung. Abbildung 1 zeigt den mittleren Temperaturverlauf in der Nordschweiz seit dem Beginn der systematischen Messungen im Jahre 1864 (Quelle: MeteoSchweiz, 2011). Die Klimaentwicklung der Nordschweiz zeigt einen deutlichen Trend zu wärmeren Temperaturen.



**Abb. 1:** Mittlerer Temperaturverlauf in der Nordschweiz. Es sind die Abweichungen der Jahreswerte und saisonalen Werte vom Durchschnitt der Normperiode 1961-1990 und die sich daraus ergebende Klimaentwicklung (langjähriges Mittel; Trend) dargestellt. Messstationen Nordschweiz: Genève (GVE), Basel (BAS), Bern (BER), Zürich (SMA). *Quelle:* [http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima\\_heute/trends\\_schweiz.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/trends_schweiz.html)

Bei der durch die EWS wegzuführende Wärme kann es sich zum einen um Abwärme von Geräten (z. B. Computeranlagen von Rechenzentren) oder um die sommerliche Überschusswärme in Gebäuden handeln. Wird ein Gebäude passiv über eine geothermische Anlage gekühlt, so wird dies allgemein als „Freecooling“ oder „Geocooling“ bezeichnet. Damit gemeint ist die sanfte Form des Herunterkühlens eines Gebäudes. Gerade diese Option ist seit dem Hitzesommer von 2003 und der prognostizierten Klimaerwärmung eine interessante Nutzungsvariante der Gebäudeheizung. Mit der Kühlung und der damit verbundenen Wegführung von überschüssiger Wärme wird die EWS einerseits zu einem saisonalen Speicher von Wärme – schliesslich wird die in den Boden gebrachte Wärme während der Heizphase wieder zurückgewonnen – andererseits verkürzen sich durch die zugeführte Wärme die Regenerationszeiten der nach dem Winter abgekühlten Sondenumgebung (Abb. 2).



**Abb. 2:** Beispiel für die saisonale Temperaturentwicklung einer mit Freecooling betriebenen EWS in der Nordschweiz (EBERHARD & Partner AG, 2009): links ist die Temperaturskala der EWS-Messfühler (grün, rot, orange), rechts ist die Skala für die Aussentemperaturen (hellblau) bzw. die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf (schwarz) dargestellt. Ist die Wärmepumpe eingeschaltet, so soll die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf 3 bis 4 Kelvin betragen. In der Grafik wurde diese Differenz für den Heizbetrieb bei +3 bis +4 °C bzw. im Freecooling bei -3 bis -5 °C eingezeichnet. Weitere Erläuterungen im Text.

Auch die am Gebäude der EBERHARD & Partner AG (Aarau) gemessenen mittleren Aussentemperaturen spiegeln diese prognostizierte Entwicklung der Sondentemperaturen wider. Die Aussentemperaturen (Abb. 2, hellblaue Linie) korrelieren normalerweise mit den im Wärmeträgermedium *in situ* gemessenen Temperaturen (rote, orange, grüne Linie). Im Beispieldiagramm von Abbildung 2 wurde im gesamten Mai nur die Wärme für die Erzeugung des Brauchwarmwassers entzogen. Dieser Wärmeentzug wird durch die konstante Temperaturspreizung von 3 bis 4 K zwischen Sondenvor- und -rücklauf dokumentiert (schwarze Linie). Am 25. Juni wurde der Freecooling-Betrieb der EWS-Anlage eingeschaltet. Aufgrund der hohen Gebäudetemperaturen stiegen die Temperaturen in den EWS-Sonden anfangs ungewöhnlich stark an. Erst im Laufe des Juli normalisierten sich die Temperaturwerte wieder. Das Beispiel illustriert den positiven Einfluss des Freecoolings auf die nach der Heizphase ausgekühlten Sonden. Die zugeführte Wärme führt zu einem erheblichen Anstieg der Temperatur im Wärmeträgermedium, was wiederum eine deutliche Verkürzung der Regenerationszeit der abgekühlten Sonden zur Folge hat.

Bislang gibt es keine langfristigen Messwerte für die Nutzung einer EWS als saisonaler Wärmespeicher. Ähnlich verhält es sich hinsichtlich Effizienzstudien sowie Untersuchungen zur thermischen Behaglichkeit während des Heizens und Kühlens mit Erdwärmesonden. Gerade beim freien Kühlen besteht die Möglichkeit eines deutlichen Anstiegs der relativen Luftfeuchtigkeit. Theoretisch besteht die Möglichkeit, dass es zur Kondensation auf den gekühlten Flächen kommen kann.

## 2. AUFTRAG

Von der EBERHARD & Partner AG in Aarau wurde im November 2007 beim Bundesamt für Energie (BFE) ein Gesuch zur Kofinanzierung eines Forschungsprojektes zur Effizienz- und thermischen Behaglichkeitsermittlung nach SIA Vorgaben einer über den Fussboden wirkenden erdgekoppelten Heiz- und Kühlanlage gestellt. Die konkreten Ziele des vorgeschlagenen Forschungsvorhabens waren:

- Ermittlung der Effizienz der Wärmeenergiegewinnung und Gebäudeversorgung
- Ermittlung neuer praxisnaher Erkenntnisse über die Problematik der Kondensation und Bildung von Bodenfeuchte durch den Betrieb der Anlage im Freecoolingbetrieb
- Ermittlung der Behaglichkeit in den Büroräumen

Die Projektstudie sollte grundlegende Betriebsdaten mit langfristigen Messwerten zur Energieentnahme und –speicherung sowie Behaglichkeit speziell während des Freecoolings liefern. Hierfür wurden an verschiedenen Stellen Messinstrumente installiert und die Werte zentral gespeichert. Das beabsichtigte Monitoring sollte die ersten 2 ½ Jahre (Heizperioden 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011 und die Kühlphasen im Frühling/Sommer 2009, 2010) umfassen. Ergänzend sollten ökonomische Überlegungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sowie der Leistungsfähigkeit der Forschungs- und Pilotanlage erarbeitet werden. Die EBERHARD & Partner AG wurde im Januar 2008 vom Bundesamt für Energie in Bern mit der Durchführung des beschriebenen Forschungsprojektes (Anlagenbau, Messkampagne, Datenauswertung) beauftragt.

## 3. STANDORT

Die Forschungsanlage wurde am Firmensitz der EBERHARD & Partner AG an der General Guisan-Strasse 2 in 5000 Aarau im Kanton Aargau / Schweiz realisiert (Koordinaten: 646'255 / 247'800). Die Grundwasserkarte erlaubte die Beantragung und Erstellung von Erdwärmesonden (Beilage 1). Auf der Westseite des Bürogebäudes wurden schliesslich drei jeweils 225 m tiefe Erdwärmesonden eingebaut (Beilagen 2 bis 4).

## 4. GEOLOGIE / HYDROGEOLOGIE

Die Aufschlussbohrungen haben gezeigt, dass der überwiegende Teil der Erdwärmesonden in den Kalken des Jura realisiert wurden (Beilage 5). In den oberen 34 m liegen quartäre Deckschichten (Schwemmlehme und Hochterrassenschotter) vor. Diese werden ab 34 m von 12 m mächtigen Kalksteinen der Wangener Schichten unterlagert. Ab 46 m liegen die Kalksteine der Crenularis-Schichten mit einer Mächtigkeit von 4 m und weiter in der Tiefe folgen im Liegenden die 16 m mächtigen Geissberg-Schichten. In den restlichen 159 m bis zur Endtiefe wurden die Mergelkalke der Effinger-Schichten angetroffen.

## 5. GEOTHERMISCHES UMFELD

Der Thermal Response Test (TRT) ist eine etablierte Standardmethode, mit der die physikalisch-thermischen Eigenschaften des direkten Sondenumfeldes bestimmt werden. Neben der effektiven Wärmeleitfähigkeit werden der thermische Bohrlochwiderstand sowie die mittlere ungestörte Untergrundtemperatur ermittelt. Diese drei Parameter sind die wesentlichen Eingangsgrößen zur Berechnung des thermischen Verhaltens einer oder mehrerer Erdwärmesonden bzw. dienen als Grundlage zur Optimierung von geothermischen Anlagen. Die detaillierten Messwerte sind vor allem dann interessant, wenn man Planungssicherheit bei der Beurteilung einer Erdwärmesondenanlage erhalten will. Daneben wird die Abschätzung der Leistungsfähigkeit einer EWS bzw. eines EWS-Feldes schwierig, wenn evtl. wassergefüllte Klüfte erbohrt werden.

Am 19.02.2008 wurde mit dem kabellosen Datenlogger NIMO-T der GEOWATT AG ein ungestörtes Temperatur-Tiefenprofil durch einen Schenkel der Sonden-U-Rohre als Referenzprofil erstellt (Beilage 6). Der Bereich zwischen 0 und 25 m ist durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen saisonal beeinflusst (Beilage 6, Pfeil). Weiter zeigten die Untersuchungen, dass ab einer Tiefe von 125 m die Temperatur mit etwa 0.06 K/m steigt. Dieser erhöhte geothermische Gradient wird mit dem nordschweizerischen Permo-karbon-Trog in Verbindung gebracht. Es ist bekannt, dass im südlichen und nördlichen Randbereich dieses Troges warme Tiefenwässer zirkulieren, welche zu einer Erhöhung des geothermischen Gradienten führen. Ab 50 m setzt der kontinuierliche Anstieg des geothermischen Tiefengradienten ein. Die bestimmte mittlere ungestörte Gebirgstemperatur beträgt 14.4 °C.

Unmittelbar nach dem TRT wurden zwei Temperaturprofile erstellt. Beide zeigen zwischen 25 und 50 m Tiefe einen unregelmässigen Verlauf. Diese Anomalien werden durch die Präsenz eines Kluftwasservorkommens verursacht, welches eine schnellere Regeneration der Gesteinstemperatur zur Folge hat. Die Auswertung des TRT ergab eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 2.14 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  und einen relativ geringen Bohrlochwiderstand von  $R_b = 0.071 \text{ (m}\cdot\text{K)}/\text{W}$ . Der geringe Bohrlochwiderstand ist ein Indiz für die gute Einbindung der EWS in den Untergrund. Die Ausgangsbedingungen und Parameter der drei Sonden waren damit hinreichend bekannt.

## 6. AUSGANGSLAGE UND AUSLEGUNGSDATEN

Das Projekt „Forschungs-EWS Aarau“ wurde im Südwesten der Stadt Aarau (AG) in einem neu gebauten dreistöckigen Bürogebäudes errichtet (Beilagen 2 bis 4). Geografisch befindet es sich im Grenzbereich Schweizer Mittelland / Jura-Südfuss auf etwa 411 m Höhe über Meer. Gleichzeitig wurden Forschungsergebnisse des Bundesamtes für Energie in Bern mit berücksichtigt (z. B. Minder, 2010; Afjei et al., 2007; Bassetti et al., 2006). Verschiedene Forschungsprojekte haben gezeigt, dass ein deutlicher Wärmeverlust im obersten Teil einer nicht isolierten Erdwärmesonde auftreten kann (EBERHARD & Partner AG, 2003, 2004a+b & 2005). Um eine saisonale Beeinflussung der Soletemperaturen weitgehend auszuschliessen, wurden die obersten Meter der Erdwärmesonden isoliert. Die drei Sonden sind im Technikraum (Keller) über einen Sammelblock zusammengeführt.

Zur genaueren Abschätzung der Leistungsfähigkeit der realisierten EWS bzw. zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes wurde noch im Februar 2008 ein Thermal Response Test (TRT) durchgeführt (siehe Kap. 5). Im Herbst 2008 wurde nach Beendigung der Bauarbeiten in jede der drei EWS ein PT 100 Temperaturfühler eingebaut. Ein Messfühler ist in 50, einer in 125 und einer in 225 m Tiefe direkt im Sondenrohr installiert. Seither konnte die *in situ*-Soletemperatur ständig auf drei unterschiedlichen Tiefenniveaus gemessen werden.

Für die Aussenfassade des Bürogebäudes kamen Materialien zum Einsatz, welche normalerweise für Bauwerke mit Minergie®-Standard eingesetzt werden. Zudem besitzt das ganze Gebäude durch die massive Betonbauweise ein hohes thermisches Speichervermögen. Dies hat zur Folge, dass sich das Gebäude

im Sommer relativ langsam aufheizt, während im Winter die Wärme relativ lange gespeichert wird. Gerade im Frühling bzw. im Herbst wirkt sich diese thermische Trägheit positiv auf das Raumklima aus. Gleichzeitig fällt bei tiefstehender Sonne (Winter) viel Licht und Wärme in die Büroräume während bei höher stehendem Sonnenstand (Sommer) eine vorgelagerte Veranda Schatten spendet. Die baulichen Massnahmen unterstützen auf natürliche Weise das Raumklima während der Heiz- und Kühlperiode. In den Büroräumen findet der Energieaustausch über eine Flächenheizung in Form einer Fussbodenheizung statt. Die reine Nutzfläche beträgt etwa 1000 m<sup>2</sup>. Die notwendige Wärmeversorgung wird durch eine effiziente Wärmepumpe (Natura BHW134.1) mit 36.7 kW (B0/ W35) Heizleistung erbracht. Die EWS werden nicht nur für die geothermische Beheizung und Brauchwarmwassererzeugung, sondern zusätzlich zum Kühlen eingesetzt. Dadurch wird eine saisonale Wärmespeicherung im Boden sowie eine Verkürzung der Regenerationszeit der nach der Heizphase thermisch beanspruchten EWS möglich.

#### *Kenndaten der Heizungsanlage:*

Baujahr der Anlage	2008
Energiebezugsfläche	~1000 m <sup>2</sup>
Länge der EWS	3 x 225 m (=675 m)
Wärmeverteilung	Bodenheizung
Kühlung über	Bodenheizung
Wärmeleistungsbedarf des GB (bei -8°C)	30 kW
Max. Heizleistung WP (B0 / W35)	36.7 kW
Leistung EWS (Verdampfer)	27.75 kW
Leistung Kompressor (el. Leistungsaufnahme)	8.95 kW
COP (Leistungszahl)	4.1

#### *Leistung der Umwälzpumpen*

Primärpumpe (PP) Grundfos CR 10-2	0.75 kW
Ladepumpe (LP) Vitoset UPS 32-60	0.07 kW
Heizungspumpe (HZP) Grundfos Alpha 32-60	0.126 kW
Brauchwarmwasser (BWP) Viessmann UPS 32-80 B	0.245 kW
Kühlpumpe (KP) Grundfos UPS 32-80	0.24 kW
Wärmepumpentyp	BWH 134
Fabrikat	SATAG Natura
Frostschutzmittel im Sondenkreislauf	Ethylenglykol 20 %
Füllmenge	6 kg
Kältemittel	R407C
Viessmann Elektro Standspeicher	B 800 EL/E 800L

#### *Messgeräte:*

2 Wärmezähler (Rechenwerk 25 % Glykol)	GWF EnerCal F3
1 Wärmezähler (Rechenwerk classic S)	Techem MID BN 50
6 Temperaturfühler für Wärmezähler	PT 500 Tauchfühler
3 Woltmannzähler	GWF WPKD
1 Temperaturfühler (Aussentemperatur)	PT 100 Tauchfühler
3 Temperaturfühler (Raumtemperaturen, Bodentemperatur)	PT 100 Tauchfühler

1 Temperaturfühler / Hygrometer Rotronic M22W2HT-1X	PT-100 Kombigerät
3 Temperaturfühler (Soletemperaturen auf 50, 125 und 225 m)	PT 100 Tauchfühler
6 Temperaturfühler (Vor- und Rückläufe, Sonde, Heizung)	PT 100 Anlegefühler
6 Betriebsstundenzähler	(WP, PP, LP, HZP, BWP, KP)

*Beratung / Planung / Installation:*

Vorburger AG, Aarau-Rohr  
Chestonag AG, Seengen  
EBERHARD & Partner AG, Aarau

## 7. MESSKONZEPT / MESSINSTALLATION

Das Messkonzept ist entsprechend der Zielformulierungen des Forschungsprojektes konzipiert (Beilagen 7 bis 9). Ein besonderes Gewicht wurde auf die Bestimmung der Raumklimadaten (z. B. Kühlung in Verbindung mit der Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit) sowie der eingebrachten bzw. entzogenen Wärmemengen gelegt.

Zum Erreichen der Vorgaben sind Wärmezähler installiert, welche stündlich die entzogene und zugeführte Wärmemenge in und aus den Sonden messen. Daran gekoppelt sind Betriebsstundenzähler welche die Laufzeiten aller im System befindlichen Pumpen (Wärmepumpe, Primär-, Heiz- und Kühlpumpe sowie Ladepumpe für Warmwasserspeicher) aufzeichnen. Die im System integrierten Pumpen arbeiten mit konstanter Stromaufnahme. Einzige Ausnahme stellt die Heizungspumpe (HZP) dar. Hier wird die optimale Regelkennlinie automatisch eingestellt wodurch eine dynamische Leistungsaufnahme resultiert. Im Mittel kann von einer 70 %igen Aufnahme der maximalen Leistung ausgegangen werden (siehe Kap. 3). Weiterhin werden die Temperaturen im Primärkreislauf (Glykolkreislauf) durch 5 Temperaturfühler überwacht. Diese sind im Sondenkreis in 50, 125 sowie auf 225 m Tiefe installiert. Weiterhin wird die Vorlauf- bzw. Rücklauf-temperatur nach dem Sammelblock gemessen.

Die Temperaturen des Sekundärkreislaufs werden ebenfalls durch 5 Temperaturfühler überwacht. Diese sind direkt an der Wärmepumpe am Vor- und Rücklauf des Heizkreislaufes sowie beim Einlauf, respektive Rücklauf der Fussbodenheizung installiert. Ein weiterer Temperatursensor ist im Bereich der Fussbodenheizung verlegt und in den Anhydrit-Unterboden eingegossen (Beilage 9). Dieser Temperaturfühler nimmt ferner eine Schlüsselstellung in Bezug auf die Taupunktproblematik ein.

Weitere Temperaturfühler überwachen die Rauminnentemperatur auf drei verschiedenen Raumhöhen (35, 150, 230 cm) sowie die Aussentemperatur. Ein Hygrometer misst die Luftfeuchtigkeit im Innenraum des Grossraumbüros im ersten Stock, welches gleichzeitig als Referenzraum dient. Durch diese Daten ist es möglich, die sukzessive Bauaustrocknung sowie im Freecooling-Betrieb die Kondensationswahrscheinlichkeit kontinuierlich zu überwachen. Insgesamt werden 27 Parameter gemessen und gespeichert:

*Folgende Daten werden automatisch in regelmässigen Abständen (5 min) erfasst:*

- Aussentemperatur [°C]
- *in situ*-Temperaturen der Erdwärmesonden auf 50, 125 sowie 225 m [°C]
- Bodentemperatur der Fussbodenheizung des Referenzraumes [°C]
- Lufttemperaturen im Büroinnenraum auf 35 cm, 150 cm sowie 230 cm [°C]
- Vor- und Rücklauftemperatur der Erdwärmesonde [°C]
- Vor- und Rücklauftemperatur des Heizkreislaufes [°C]
- Temperaturen des Kühlkreises im Vor- und Rücklauf [°C]
- Luftfeuchte im Büroinnenraum [%]

*Folgende Parameter werden stündlich automatisch erfasst:*

- Wärmezählung im Primärkreislauf [kWh]
- Wärmezählung im Sekundärkreislauf [kWh]
- Wärmezählung im Kühlbetrieb [kWh]
- Durchflussmessung im Primär- und Sekundärkreislauf [m<sup>3</sup>/h]
- Durchflussmessung im Kühlkreislauf [m<sup>3</sup>/h]
- Betriebsstundenzählung Wärmepumpe [h]
- Betriebsstundenzählung Primärpumpe [h]
- Betriebsstundenzählung Umwälzpumpe Speicherladung [h]
- Betriebsstundenzählung Umwälzpumpe Heizen [h]
- Betriebsstundenzählung Umwälzpumpe Kühlen [h]
- Betriebsstundenzählung Umwälzpumpe Brauchwarmwasser [h]

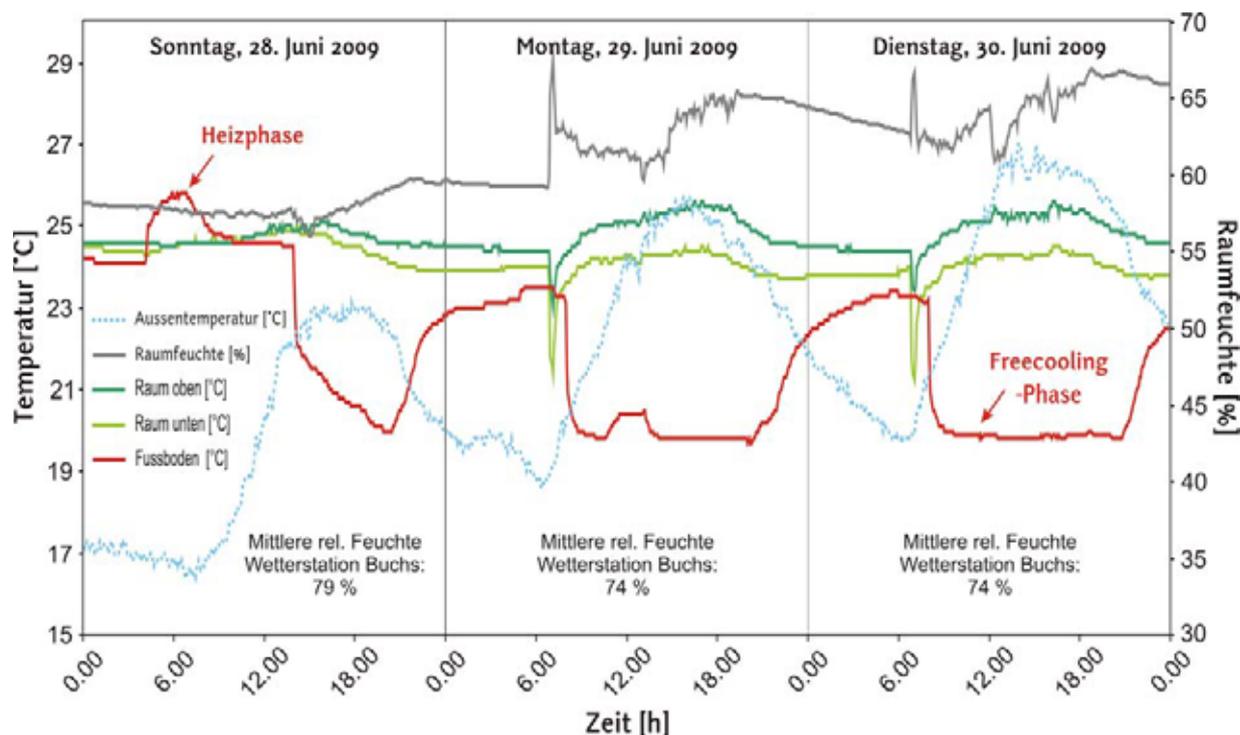
Die Daten spiegeln unter Alltagsbedingungen zu jedem Zeitpunkt den genauen Zustand des kompletten Heizungssystems über das gesamte Jahr wider. Seit dem 25. November 2008 werden die oben beschriebenen Parameter in den korrekten Intervallen erfasst. Standzeiten, reduzierter Heizungsbetrieb bzw. Anlagestörungen wie sie beispielsweise während der Betriebsferien oder in der Übergangszeit der Fall ist, wurden in den Grafiken gekennzeichnet. Um mit einer korrekten Datengrundlage arbeiten zu können, wurde die erste monatliche Gesamtauswertung der Anlage (mit Wärmezähler) auf den Dezember 2008 gelegt. Seit Dezember 2008 werden monatliche Auswertungen, der energetischen und betriebstechnischen Parameter aufgezeichnet (Beilagen 10 bis 37).

## 8. MESSRESULTATE

Ab dem 25. September 2008 wurden die *in situ*-Temperaturen in den EWS kontinuierlich gemessen. Nachdem sich die natürlichen Gebirgstemperaturen in den EWS eingestellt hatten, blieben die Temperaturen bis zur Inbetriebnahme der Wärmepumpe konstant. Die ungestörten Temperaturen in 50 m betragen 12.0 °C in 125 m 15.3 °C und in 225 m Tiefe 21.3 °C (Beilage 6).

Erstmals geheizt wurde am 13. Oktober 2008. Der erste vollständige Datensatz für einen gesamten Monat liegt ab Dezember 2008 vor.

Als im Frühjahr 2009 mit der Anlage erstmals gekühlt wurde, konnten die während des Kühlens gewonnenen detaillierten Raummessungen genauer betrachtet werden (Abb. 3).



**Abb. 3:** In rot wird die Temperatur des Bodens (Fussbodenheizung) während einer kurzen Heizphase (Ausstentemperatur sinkt kurz unter 17 °C), des Freecoolings und der Stillstandszeiten dargestellt. Der Temperaturfühler „Raum unten“ befindet sich 35 cm, der Fühler „Raum oben“ 2.30 m über dem Boden. Die Raumfeuchte wurde zur Information, wann gelüftet wird (z.B. 7:00 Uhr Lüften), mit dargestellt. Bei der Ausstentemperatur handelt es sich um 5 Minuten Werte des am Gebäude installierten Temperaturfühlers. Weitere Erläuterungen im Text.

Aus Abbildung 3 geht hervor, dass während des Heizens die Luft im gesamten Raum eine einheitliche Temperatur von etwa 24 °C hatte (Sonntag, 4:00 bis 7:00 Uhr). Mit dem Anstieg der Ausstentemperatur und dem Einsetzen des Freecoolings entsteht eine thermische Schichtung zwischen kühlem Fussboden und Decke. Obwohl während der Werkzeuge mindestens 7 Personen anwesend waren und immer wieder gelüftet wurde, stellte sich eine stabile Schichtung der Raumluft ein (Abb. 3, hellgrüne bzw. dunkelgrüne Linie). Während die Ausstentemperatur auf über 27 °C stieg, hielt der Fussboden konstant eine Temperatur von etwa 19 °C. Gleichzeitig stellte sich im Referenzraum eine Temperatur von 24 °C ein. Am Gebäude wurden teilweise Ausstentemperaturen von über 30 °C gemessen, während die Arbeitsräume konstant 5 bis 6 °C kühler waren. Die Behaglichkeit wurde durch die Strahlungskälte der grossen Fussbodenfläche positiv unterstützt. Im gesamten Beobachtungszeitraum ergaben sich bezüglich der Taupunktproblematik keinerlei Probleme.

Insgesamt zeigten die bisherigen Daten, dass das Messkonzept schlüssig ist. Es zeigte sich auch, dass die vom Wärmepumpenhersteller werkseitig vorgenommenen Einstellungen verbesserungsbedürftig waren, d. h. zusammen mit dem Hersteller wurden im Sommer 2009 die Einstellungen optimiert, wodurch ein zusätzlicher Vergleich zwischen einer nicht optimierten Wärmepumpe (Heizphase 2009 / 2010) und optimierten Einstellungen (Heizphase 2010 / 2011) möglich wurden (Kap. 14).

Die effektiven jahreszeitlichen Heiz- und Kühlphasen sind das Resultat des Klimas / Wetters und richten sich zudem nach den Bedürfnissen der Bewohner eines Gebäudes. Demnach kann der genaue Beginn bzw. das genaue Ende des Heizens oder Kühlens auf unterschiedliche Tage oder Monate fallen. Dementsprechend wurden zur energetischen Auswertung der Daten eine Heiz- (Oktober bis April) und eine Kühlperiode (Mai bis September) definiert (Tabelle 1).

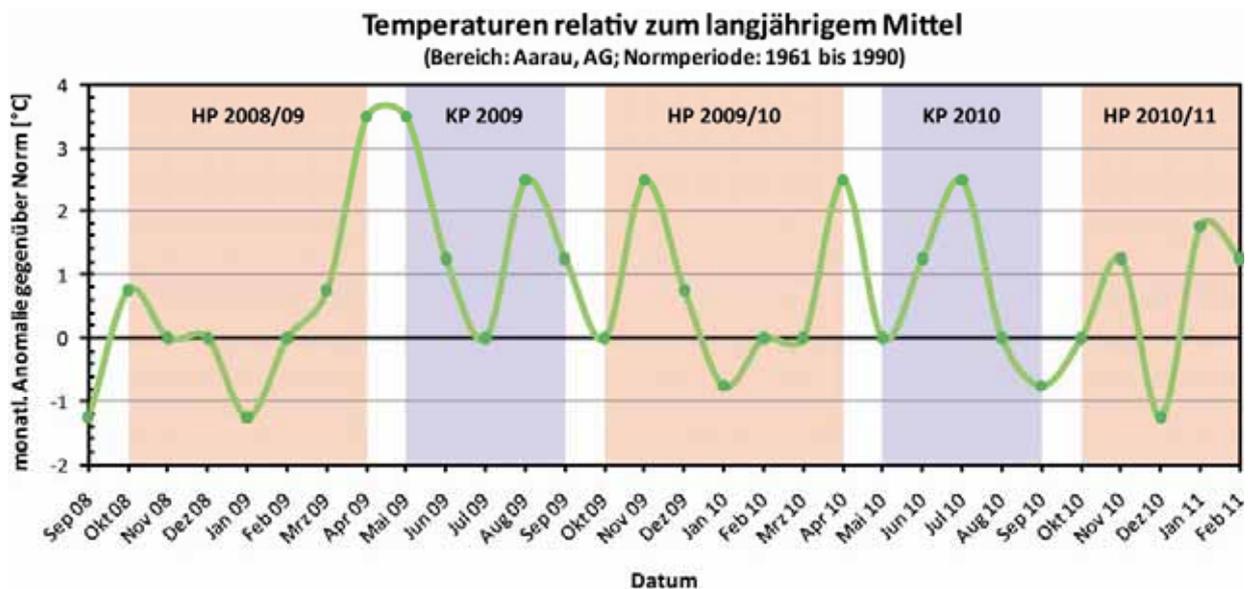
	Zeitabschnitt	effektiver Beginn	effektives Ende	Heiz- bzw. Kühlsaison (für Auswertung)
<b>Heizen</b>	2008 / 2009	13. Oktober 2008	25. Juni 2009	Okt. - April
	2009 / 2010	8. Oktober 2009	27. April 2010	Okt. - April
	2010 / 2011	27. September 2010	<i>noch nicht abgeschlossen</i>	Okt. - April
<b>Freecooling</b>	2009	28. Juni 2009	1. September 2009	Mai – Sept.
	2010	24. Mai 2010	26. August 2010	Mai – Sept.

**Tab. 1:** Beginn bzw. Ende der jeweiligen tatsächlichen Heiz- oder Kühlphase. Für die Auswertung wurden standardisiert und wetterunabhängig immer die gleichen Zeiträume angenommen.

## 9. AUSWERTUNG DER TEMPERATURMESSUNGEN

### Allgemeine Klimadaten

*Datengrundlage:* Klimatologische Daten unterliegen teilweise recht starken Schwankungen. Um diese Variabilität zu relativieren und international vergleichbar zu machen, wurde von der World Meteorological Organisation 30-jährige Standardperioden zur Bestimmung von klimatologischen Normwerten festgelegt (z. B. 1901-1930). MeteoSchweiz hat aus einem vollständigen, gesamtschweizerischen Datensatz für den Zeitraum 1961 bis 1990 einen aktuellen Normwert erstellt. Dadurch werden aktuelle Temperatur- und Klimadaten vergleichbar. MeteoSchweiz stellt auf ihrer Homepage Klimakarten der Schweiz in monatlicher und jährlicher Auflösung zur Verfügung. Aus den Monatskarten mit den langjährigen Temperaturvergleichsdaten wurden für den Raum Aarau die angegebenen Werte entnommen und in Bezug zu den Heiz- und Kühlphasen der Forschungsanlage Aarau gestellt (Abb. 4)



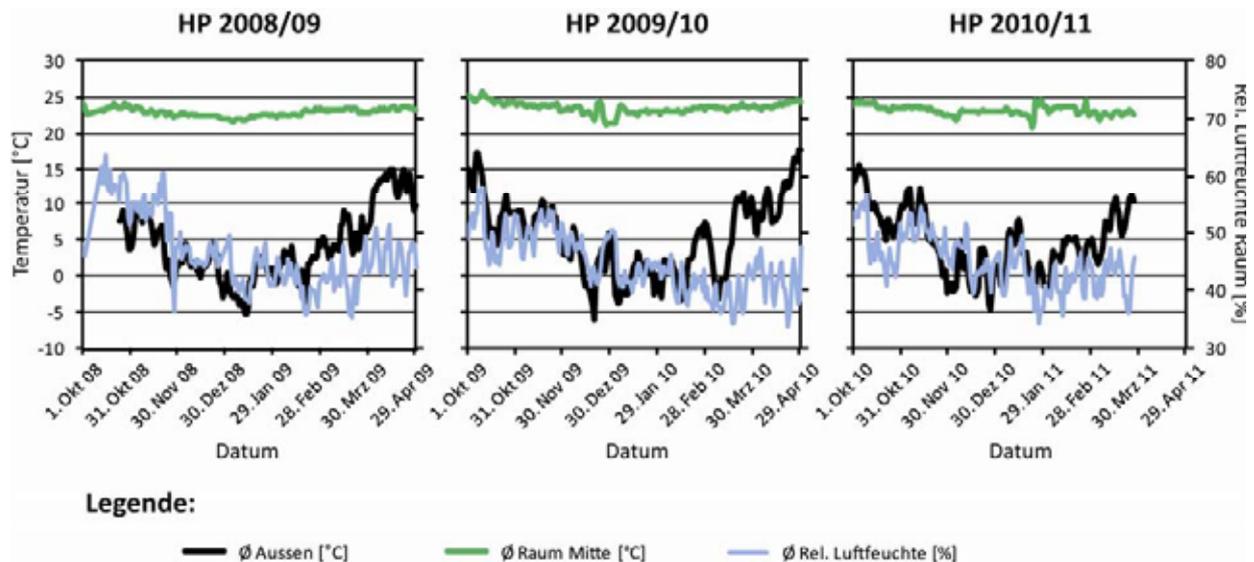
**Abb. 4:** Temperaturdaten für den Raum Aarau in Bezug zum langjährigen Mittel. Die Datenpunkte (dunkelgrün) wurden aus den Monatsmittelkarten für Temperaturen in der Schweiz mit Abweichung vom langjährigen Mittel 1961 bis 1990 für den Raum um Aarau entnommen (Quelle: [http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima\\_heute/klimakarten\\_schweiz.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_heute/klimakarten_schweiz.html)). Im betrachteten Zeitraum waren die Temperaturen im Bereich der Forschungsanlage fast immer über dem langjährigen Trend. Weitere Erläuterungen im Text. HP=Heizperiode, KP=Kühlperiode

*Interpretation:* Aus Abbildung 4 geht hervor, dass fast über den gesamten Beobachtungszeitraum die allgemeinen Temperaturen über dem langjährigen Mittel lagen. Dies betrifft die Heizperioden (HP) wie auch die Kühlperioden (KP). Bislang gab es in jeder Heizperiode höchstens einen Monat mit überdurchschnittlich kalten Temperaturen. Wird die gesamte HP berücksichtigt, so handelte es sich eher um milde Winter. In diesem Zusammenhang sind die beiden Wärmephasen am Ende von HP 2008/09 bzw. HP 2009/10 besonders auffällig. Auch am Standort der Forschungsanlage wurden zu diesem Zeitpunkt sehr hohe Aussentemperaturen gemessen (Abb. 5).

Ähnliches gilt für KP 2009 und KP 2010. An sechs von zehn Monaten lagen die Temperaturen teilweise deutlich über dem langjährigen Mittel. Dementsprechend lief die Kühlpumpe für das Freecooling länger und häufiger als während eines kühleren „Standardsommers“.

## 9.1 Raum- und Aussentemperaturen sowie Luftfeuchte im Innenraum während der Heizphasen (Okt. – April)

*Datengrundlage:* Zur Erstellung der in Abbildung 5 wiedergegebenen Grafiken wurden Tagesmittelwerte berechnet. Hierfür wurden aus den Messwerten eines Tages (z. B. 8640 Einzelmessungen für „Raum Mitte“) ein Mittelwert für einen Tag berechnet.



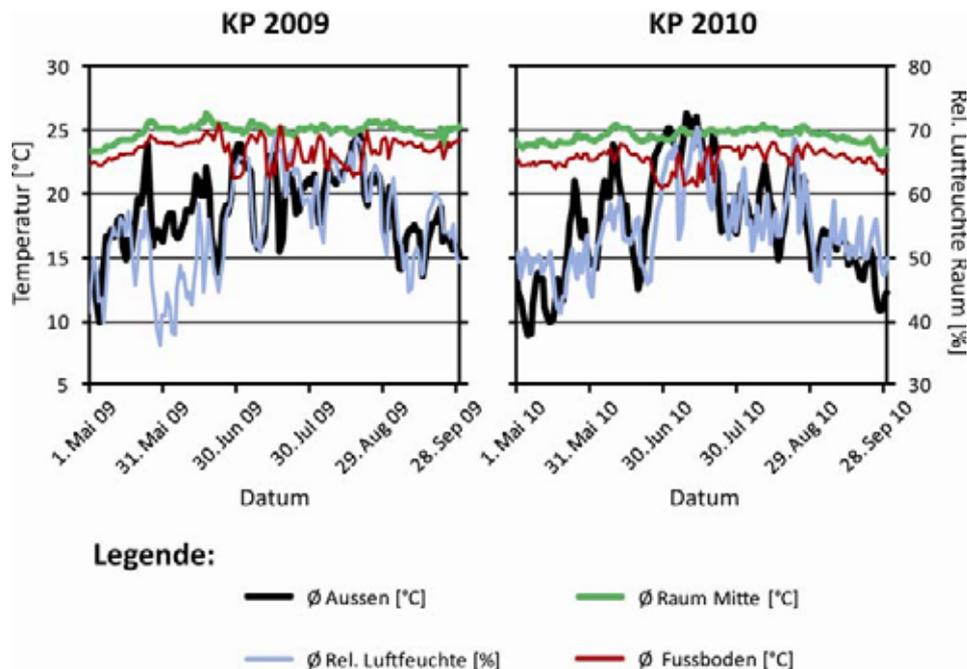
**Abb. 5:** Messkurven für Aussentemperaturen und Temperaturverlauf „Raum Mitte“ (Referenzraum, 1.5 m über Boden) sowie die Entwicklung der relativen Luftfeuchte im Referenzraum während der Heizphasen (HP) 2008/09, 2009/10 und 2010/11. Die HP 2010/11 war zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht abgeschlossen (Stand: 28. Mrz. 2011). Weitere Erläuterungen im Text.

*Interpretation:* Die Aufzeichnungen der Raumtemperaturen belegen während der Heizphase einen relativ konstanten Verlauf (Abb. 5, grüne Linie). Einzig die ab der HP 2009/10 während der Weihnachtsferien durchgeführte Reduktion der Zimmertemperatur führte zu einem deutlich tieferen Temperaturverlauf. Bei den Aussentemperaturen fallen besonders die relativ starken Erwärmungen am Ende von HP 2008/09 und HP 2009/10 auf (Abb. 5, schwarze Linie). Diese ungewöhnlichen Warmphasen wurden ebenso von MeteoSchweiz beobachtet (Abb. 4). Während einer HP hat die zunehmende Erhöhung der Aussentemperatur noch keinen direkten Einfluss auf die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum (Abb. 5, blaue Linie). Am Ende der HP wurden maximale Aussentemperaturen von 21 bis 23 °C gemessen, d. h. die Raum- und Aussentemperaturen waren am Ende einer HP in etwa ausgeglichen.

Zu Beginn von HP 2008/09 waren die Messwerte für die relative Luftfeuchte erhöht (Abb. 5, links). Diese ungewöhnlich hohen Werte werden mit der Bauaustrocknung des erst 2007 / 2008 fertiggestellten Bürogebäudes in Verbindung gebracht. In den Folgejahren wurden nicht mehr so hohe Feuchtigkeitswerte gemessen.

## 9.2 Raum- und Aussentemperaturen sowie Luftfeuchte im Innenraum während des Freecoolings (Mai bis Sept.)

*Datengrundlage:* Zur Erstellung der in Abbildung 6 wiedergegebenen Grafiken wurden Tagesmittelwerte berechnet. Hierfür wurde aus den Messwerten eines Tages (z. B. 8640 Einzelmessungen für „Temp\_Boden“ ein Mittelwert für einen Tag berechnet.



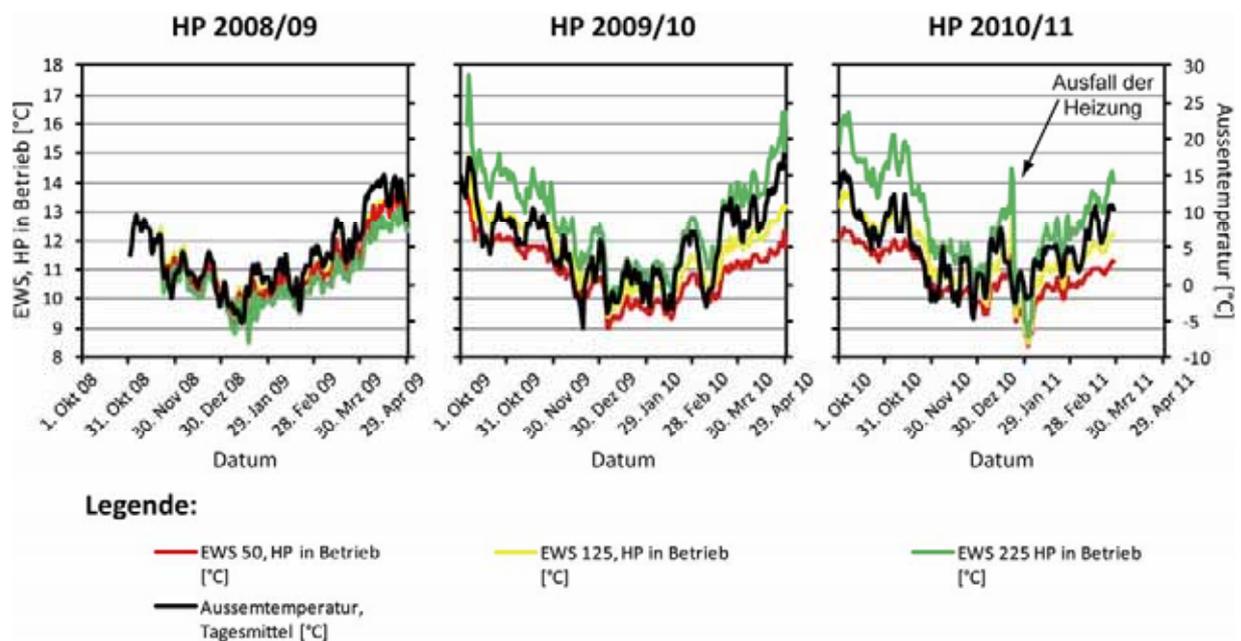
**Abb. 6:** Messkurven für Aussentemperaturen und Temperaturverlauf „Raum Mitte“ (Referenzraum, 1.5 m über Boden), Fussboden (Referenzraum, im Fussboden) sowie die Entwicklung der relativen Luftfeuchte im Referenzraum während der Kühlphasen (KP) 2009 und 2010. Weitere Erläuterungen im Text.

*Interpretation:* Im Mai 2009 bzw. 2010 gab es bereits erste Hitzetage. Zu dieser Zeit war der Kühlbetrieb noch nicht eingeschaltet bzw. aufgrund der grossen energetischen Trägheit des Gebäudes noch nicht notwendig. Die Kühlung wurde erst im Laufe des Juni in Betrieb genommen. Dies wird besonders in der Entwicklung der Bodentemperatur ersichtlich (Abb. 6, dunkelrote Linie). Aus Abbildung 6 geht zudem hervor, dass der tendenziell steigende Trend der Raumtemperatur mit dem Einschalten der Kühlung gebrochen und sich in der Folge ein fast linearer Temperaturverlauf einstellt. Die erste Analyse der Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit zeigt, dass die relative Raumfeuchte stark mit der Entwicklung der Aussentemperatur korreliert. In Kap. 10 erfolgt eine detaillierte Analyse der Entwicklung der Raumfeuchte (Taupunktproblematik) in Verbindung mit dem Freecooling.

### 9.3 Temperaturverhältnisse im Primärkreislauf während der Heizphase (Okt. bis April)

Die letzten Temperaturfühler wurden im November 2008 installiert bzw. in Betrieb genommen. Folglich ist der Datensatz vom Oktober / November 2008 teilweise noch unvollständig. Im Sommer 2009 wurden zusätzlich Teile (z. B. Rückschlagventil zwischen Primär- und Wärmepumpe, Messüberwachung Ladepumpe etc.) erneuert bzw. nachgerüstet. Zusammen mit dem Wärmepumpenhersteller wurde anhand der bisherigen Messwerte und Betriebserfahrungen eine umfassende, auf das Gebäude abgestimmte Neuprogrammierung der Wärmepumpe vorgenommen. Unter anderem wurden die Parameter des Wärmepumpen-Regelkreises (z. B. reduzierte Temperatur, Timer-Programmierung) oder die Heizkurve (Fachbetriebsebene) angepasst. Als direkte Folge dieser baulichen und programmtechnischen Änderungen vom Sommer 2009 veränderten sich die *in situ*-Temperaturverläufe in 50, 125 bzw. 225 m Tiefe (Abb. 7).

Im Januar 2011 kam es zu einem Heizungsschaden, wodurch der Sekundärkreislauf über einige Tage Heizungswasser verloren hat. Am 22. Januar 2011 ist die Heizung schliesslich ausgefallen. Noch am selben Wochenende wurde die Anlage provisorisch in Betrieb genommen. Während der folgenden Tage wurde die Heizungsanlage immer wieder für einige Stunden ganz abgeschaltet. In dieser Zeit wurde entsprechend wenig Wärme aus den EWS entzogen. In der Folge erhöhten sich sukzessive die Temperaturen im Primärkreislauf (Abb. 7, rechts).

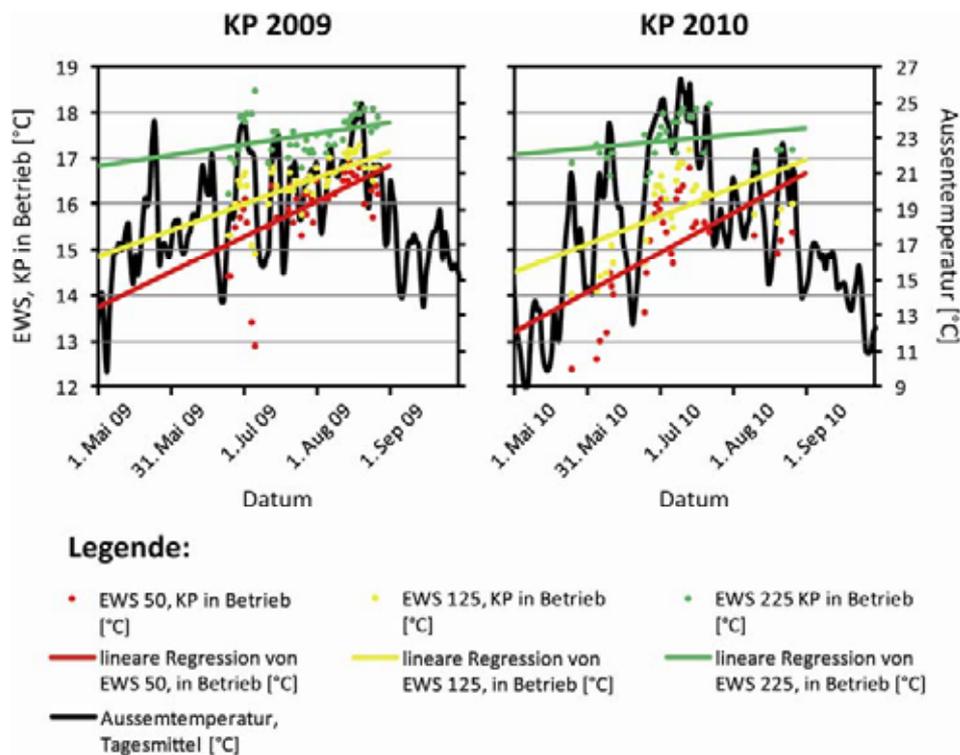


**Abb. 7:** Messkurven mit den *in situ*-Temperaturen auf 50, 125 und 225 m Tiefe im Primärkreis der drei EWS (rote, gelbe, grüne Linie) während der Heizphasen (HP) 2008/09, 2009/10 und 2010/11). Als HP gilt der Zeitraum zwischen dem 1. Oktober und dem 30. April. Ergänzend wurden die jeweiligen Ausstemperaturen in die Diagramme eingetragen (schwarze Linie). Weitere Erläuterungen im Text.

In Abbildung 7 wurden ausschliesslich die Temperaturdaten während des Betriebs der Wärmepumpe berücksichtigt. Ziel war die ausschliessliche Betrachtung des Wärmeentzugs aus den EWS. Je nach Dauer des Stillstandes regenerieren sich die Sonden dementsprechend.

## 9.4 Temperaturverhältnisse im Primärkreislauf während des Freecoolings (Mai. bis Sept.)

Das Freecooling ist stark von den Aussentemperaturen abhängig. Gewöhnlich wurde der Schalterpunkt für das Kühlen bei 24 bzw. 25 °C Aussentemperatur gesetzt. Lagen die Aussentemperaturen über einen längeren Zeitraum über 25 °C, so wurde der Schalterpunkt zeitweise auf 22 °C herabgesetzt. Durch diese Massnahme setzte das Freecooling bereits am Vormittag, also vor der eigentlichen Mittagshitze, ein. Während der Heizperiode werden gewöhnlich kontinuierliche Messreihen gewonnen. Beim Freecooling ist dies anders. Hier erhielt man maximal über einige Tage zusammenhängende Messreihen. Die sommerlichen Freecooling-Daten sind durch Schlechtwetterperioden bzw. kältere Phasen unterbrochen. Aus diesem Grunde wurden die *in situ*-Temperaturen der im Betrieb befindlichen EWS als Punkte geplottet (Abb. 8, rote, gelbe, grüne Punkte). Die lineare Regression der jeweiligen Messreihen wurde als rote, gelbe bzw. grüne Gerade in Abbildung 8 eingezeichnet. Die Steigung der Geraden repräsentiert den Energieeintrag während des Betriebs der Kühlepumpe.



**Abb. 8:** Tages-Messwerte mit den *in situ*-Temperaturen auf 50, 125 und 225 m Tiefe im Primärkreis (rote, gelbe, grüne Punkte) während der Kühlphasen (KP) 2009 und 2010). Als KP gilt der Zeitraum zwischen dem 1. Mai und dem 30. September. Die jeweilige Regressionsgerade zeigt den sommerlichen Wärmeeintrag in die EWS. Ergänzend wurden die jeweiligen Aussentemperaturen mit in die Diagramme eingetragen (schwarze Linie). Weitere Erläuterungen im Text.

In Abbildung 8 wurden ausschliesslich die Temperaturdaten während des Freecoolings berücksichtigt. Es sollte ausschliesslich die Zeit des Wärmeeintrags in die EWS berücksichtigt werden. Daneben wurde Wärme für die Erzeugung von Brauchwarmwasser entnommen. In der energetischen Gesamtbilanz (Kap. 11, ff.) wird die Energieentnahme durch die Brauchwasserpumpe mit berücksichtigt.

## 10. ANALYSE DER TAUPUNKTPROBLEMATIK

### Allgemeine physikalische Grundlagen

Die Luft unserer direkten Umwelt besteht praktisch immer aus einem Gemenge von Gasen, Flüssigkeiten – sogenannten Aerosolen – und Feststoffen. Neben den beiden Hauptkomponenten Stickstoff und Sauerstoff ist meist auch Wasserdampf in variierenden Mengen enthalten. Wasserdampf an sich ist ein farb- und geruchloses Gas. Die in der Luft enthaltene Menge an Wasserdampf ist begrenzt und ist vor allem temperaturabhängig, d. h. je wärmer die Luft ist, je mehr Wasserdampf kann in ihr enthalten sein und umgekehrt. Diese Eigenschaft hat einige Konsequenzen. Werden zum Beispiel Gegenstände aus dem Kühlschrank herausgenommen und auf den Tisch gestellt, kommt es häufig zur Bildung von Tau auf dem kalten Gegenstand. Die in der Umgebungsluft enthaltene Feuchtigkeit kondensiert und schlägt sich auf der Oberfläche nieder. Im physikalischen Sinne wurde der Taupunkt unterschritten, wodurch ein Aggregatwechsel von gasförmig nach flüssig stattgefunden hat. Was beim Essen für Frische und Erfrischung steht, will auf den Oberflächen einer durch Freecooling gekühlten Fläche niemand haben. Wird im Sommer übermässig gekühlt besteht bei hoher rel. Luftfeuchte die Gefahr von kondensierendem Wasser. Hierbei können unschöne feuchte Stellen entstehen. Zudem besteht in dauerhaft feuchten Bereichen die Möglichkeit, dass sich Schimmel festsetzt. Aus der Praxis kennt man solche Phänomene an kalten Flächen von schlecht gelüfteten Badezimmerräumen. Beim Freecooling muss diese Entwicklung unbedingt verhindert werden.

Die Vorgänge der Taubildung sind rein physikalischer Natur. Darum können die Prozesse der Taupunktproblematik verhältnismässig gut überwacht und kontrolliert werden. Ein wichtiges Kriterium ist die sog. relative Luftfeuchtigkeit. Aus diesem Grunde wurde und wird dieser Wert im Referenzraum gemessen und kontinuierlich alle 5 Minuten aufgezeichnet. Die relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  ist eine prozentuale Verhältniszahl zwischen dem aktuellen Wasserdampfdruck und dem Sättigungswasserdampfdruck.  $\varphi$  ist temperaturabhängig und ein direkter Zahlenwert für den Sättigungsgrad der Umgebungsluft mit Wasserdampf. Der Taupunkt TP wird als der Punkt definiert, bei welchem die relative Luftfeuchtigkeit auf 100 % ansteigt. Damit ist TP ebenfalls eine temperaturabhängige Grösse. Folglich kann die absolute Luftfeuchtigkeit  $\rho_w$  mit Hilfe der Umgebungstemperatur und des Taupunktes bzw. der relativen Luftfeuchtigkeit als absolute Masse des Wasserdampfs in einem definierten Volumen berechnet werden. Normalerweise wird  $\rho_w$  in g Wasser pro m<sup>3</sup> Luft angegeben.

*Taupunktberechnung:* Die Ermittlung des Taupunktes aus den im 5-Minutentakt gemessenen Parametern Raumtemperatur (Raum<sub>Ref</sub>-mittig) und rel. Luftfeuchte erfolgt schrittweise über verschiedene Formeln. Mit der Magnus-Formel für den Sättigungsdampfdruck E für Wasser wurde näherungsweise der Sättigungsdampfdruck E berechnet:

$$E_{Wasser} = 6.1078 \cdot 10^{\frac{(7.5 \cdot Temp. Raum - mittig)}{(237.3 \cdot Temp. Raum - mittig)}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Der Dampfdruck e berechnet sich mit der gemessenen rel. Luftfeuchte  $\varphi$  und dem Sättigungsdampfdruck E nach der Formel:

$$e_{Wasser} = \frac{\varphi}{100} \cdot E_{Wasser} \quad \text{Gleichung 2}$$

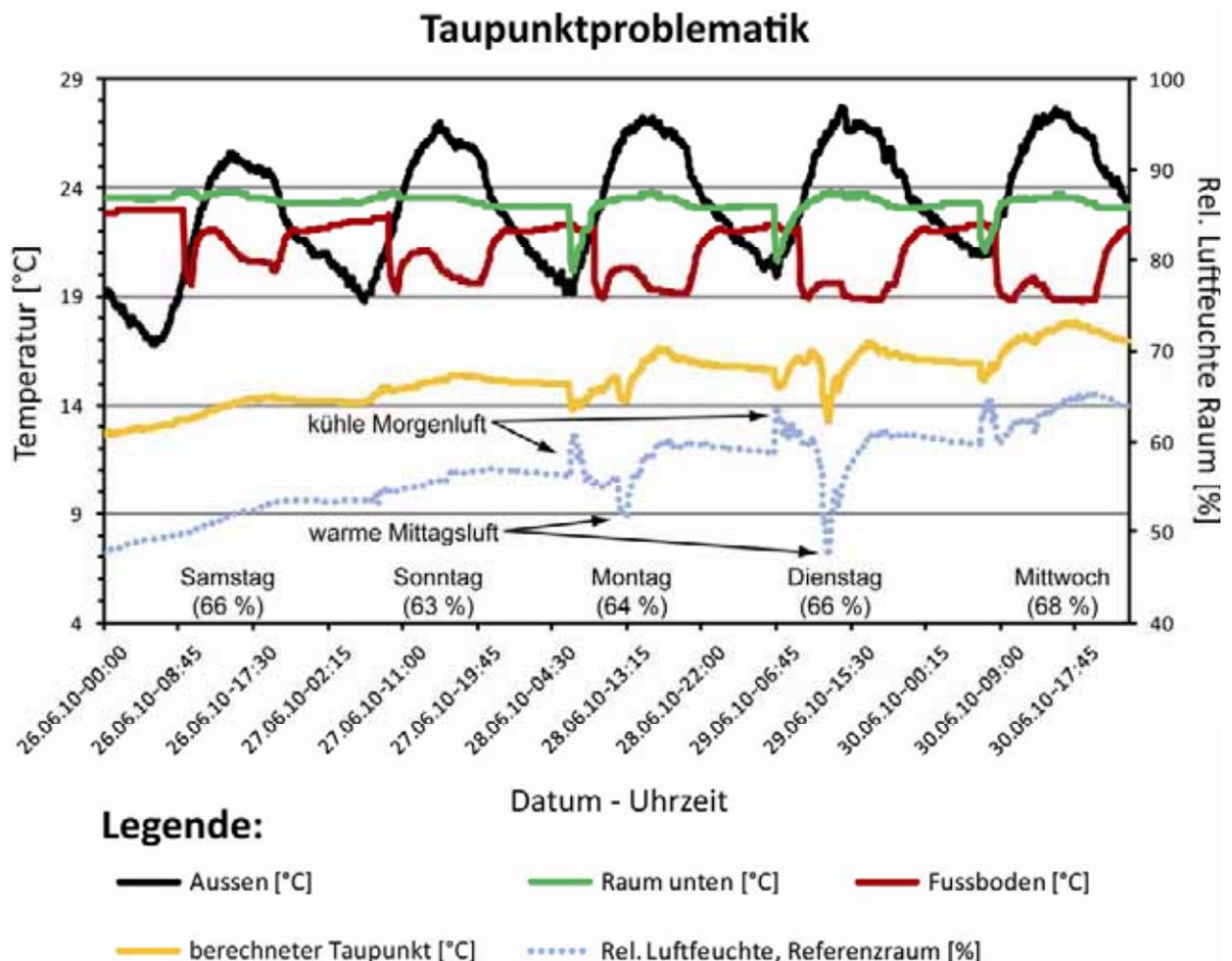
Im Falle für die Taupunkttemperatur ist der Sättigungsdampfdruck  $E_{Wasser}$  gleich dem dazugehörenden Dampfdruck. Damit kann  $\varphi$  direkt berechnet werden:

$$\varphi = 100 \cdot \frac{E_{\text{Taupunkt}}}{E_{\text{Wasser}}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Damit kann der Taupunkt TP hergeleitet und direkt nach der Formel:

$$TP = \log_{10} \left( \frac{e}{6.1078} \right) \quad \text{Gleichung 4}$$

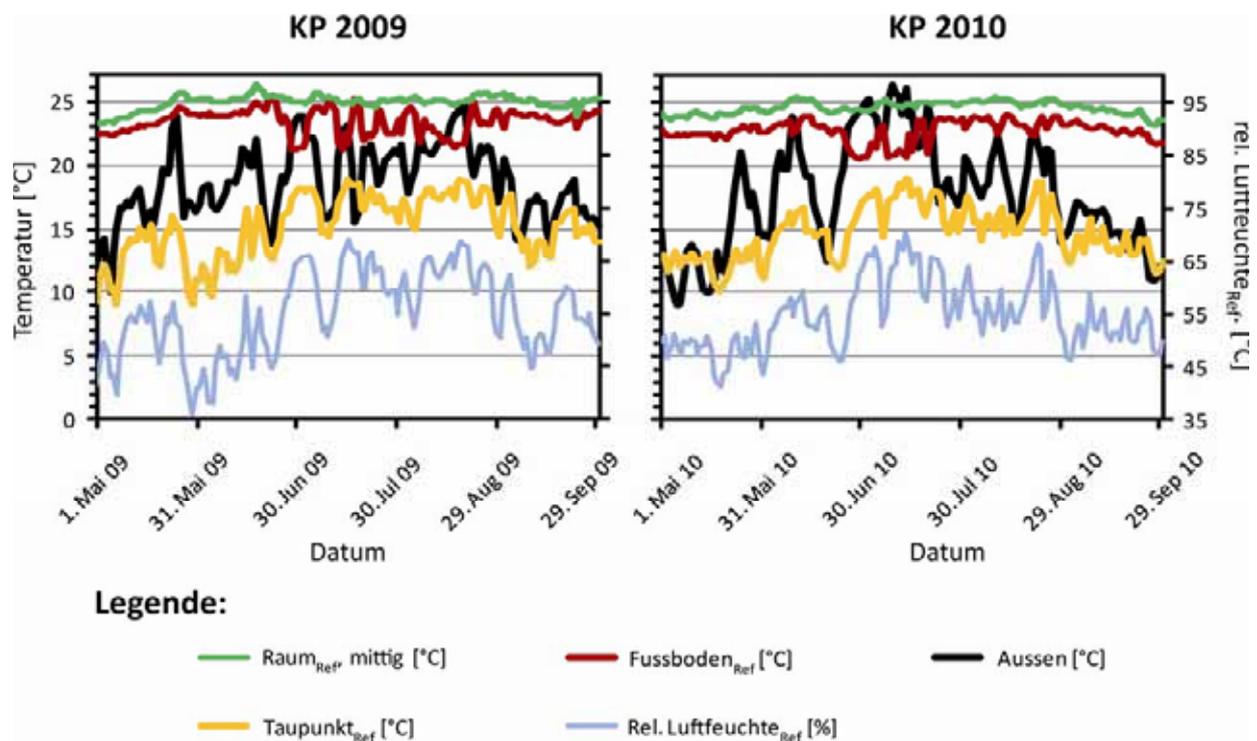
berechnet werden. Die TP-Berechnung wurde für alle Einzelmessungen während der jeweiligen Heiz- und Kühlperiode automatisiert durchgeführt. Für die erste detaillierte Analyse wurden die Rahmenbedingungen für die Kondensationsbildung für den Zeitraum vom 26. Juni bis 30. Juni 2010 detailliert untersucht (Abb. 9).



**Abb. 9:** Zusammenhang zwischen Aussentemperatur (schwarze Linie), Raumtemperatur (grüne Linie), Freecooling mit abgekühltem Fussboden (rote Linie) und Entwicklung der rel. Luftfeuchtigkeit im Referenzraum (blaue punktierte Linie). Normalerweise wird zweimal pro Tag gelüftet. Während des morgendlichen Lüftens (kühle Morgenluft) steigt die rel. Luftfeuchtigkeit im Referenzraum steil an, während des mittäglichen Lüftens (warme Mittagsluft) sinkt diese stark (Pfeile). Die Entwicklung des Taupunktes zeigt, dass während jedes Lüftungsvorganges der Taupunkt sinkt (gelbe Linie). Unter den Wochentagen ist in Klammern die von der Wetterstation Buchs bestimmte mittlere rel. Luftfeuchte des jeweiligen Tages angegeben. Weitere Erläuterungen im Text.

Aus Abbildung 9 geht hervor, dass die Tages- und Nachttemperaturen im Aussenbereich vom 26. Juni bis 30. Juni kontinuierlich gestiegen sind (schwarze Linie). Gleichzeitig wurde während des gesamten beobachteten Zeitraums mittels Freecooling passiv gekühlt (rote Linie). Durch die Kühlung des Fussbodens sind die Raumtemperaturen trotz steigender Aussentemperaturen bis zum 30. Juni tendenziell etwas gefallen (grüne Linie). Hinsichtlich der Temperaturentwicklung hat der Prozess des Freecoolings definitiv eine positive Wirkung auf das thermische Umfeld des Referenzraumes. Die relative Luftfeuchtigkeit im Referenzraum ist vom 26. Juni bis 30. Juni kontinuierlich von 48 auf 65 % gestiegen. Im selben Zeitraum wurde an der MeteoSchweiz-Wetterstation Buchs/Aarau (2.2 km ENE von der Forschungsanlage entfernt) ein leichter Anstieg der rel. Luftfeuchtigkeit im Bereich von Buchs/Aarau gemessen. Die Tagesmittelwerte schwankten zwischen 63 und 68 % (Abb. 9). Im Verhältnis zur Aussenumgebung des Gebäudes stieg die rel. Luftfeuchtigkeit im gekühlten Referenzraum deutlich schneller und stärker an.

Um die Gefahr von kondensierendem Wasser besser einschätzen zu können, wurde die Entwicklung des Taupunktes für den gesamten Beobachtungszeitraum genauer betrachtet. Aufgrund der Ergebnisse kann die Taupunktproblematik für die Heizperiode generell ausgeschlossen werden. Dieses Resultat ist aufgrund der ohnehin trockenen winterlichen Heizungsluft mit einer warmen Fussbodenheizung nicht weiter überraschend (vgl. Abb. 5). Anders sieht es während der sommerlichen Kühlperiode aus. Abbildung 10 zeigt die Entwicklung über den gesamten Zeitraum von KP 2009 und KP 2010 als Tagesmittelwert. Würde hier die berechnete Taupunkttemperatur (Abb. 10, gelbe Linie) mit der Raumtemperatur (Abb. 10, grüne Linie) zusammenfallen, so würde es zur Kondensation von Wasserdampf kommen. Die Bodentemperatur zeigt den Zeitraum mit eingeschaltetem Freecooling (Abb. 10, rote Linie). Die Tagesmittelwerte für Raumtemperatur und Taupunkt nähern sich zwar zeitweise an, eine Überschneidung – und damit eine Kondensation – fand nicht statt.



**Abb. 10:** Entwicklung des Taupunktes im Referenzraum während des Freecoolings von KP 2009 und KP 2010 (gelbe Linie). Die weiteren Tagesmittelwerte der Temperaturen des Fussbodens (rote Linie) sowie die relativ stabilen Daten vom Messfühler „Raum<sub>Ref</sub> mittig“ zeigen die Phasen der eingeschalteten Freecooling-Anlage. In hellblau ist die Entwicklung der rel. Luftfeuchte und in schwarz die dazugehörige Aussentemperatur dargestellt.

Damit ist allerdings nicht ausgeschlossen, ob es zeitweise für einige Stunden am gekühlten Boden zum Niederschlag von Wasserdampf gekommen ist. Hierfür wurden die Rohdaten der im 5-Minutentakt ge-

messenen Daten erneut genauer untersucht. Anhand dieser genauen Betrachtung der Messwerte zeigte sich, dass der Taupunkt nie erreicht wurde. Am 5. Juli 2010, 8:20 Uhr wurde mit 4.05 Kelvin der Minimalabstand zwischen Taupunkt und Temperatur im Referenzraum gefunden. Dieser Extremwert wird mit dem morgendlichen Lüften (vgl. Abb. 9) in Verbindung gebracht.

## 11. BEHAGLICHKEITSANALYSE

Der ursprüngliche Zweck einer Heizung war die Erwärmung von Räumen. Heutzutage wird von einer modernen Gebäudeheizung mehr erwartet: Sie soll den Energieträger möglichst effizient nutzen, die Heizungsanlage zum Heizen und Kühlen verwenden und dabei ein möglichst angenehmes Raumklima schaffen:

*Regenerativer, umweltfreundlicher Energieträger → Heiz- / Kühlsystem → angenehmes Raumklima*

Neben den Kosten für die Erzeugung von Heizwärme spielen die individuellen Anforderungen an eine möglichst gleichmässige Temperaturverteilung, Luftfeuchte oder die Luftbewegung eine wesentliche Rolle. Hierbei kommt es auch auf die Art der Nutzung (Wohnung, Büro, Geschäft, Werkstatt etc.) an. Demzufolge werden an die thermische Behaglichkeit eines Raumes gänzlich unterschiedliche Anforderungen gestellt.

### Die Begriffe „thermische Behaglichkeit“, PMV- und PPD-Index

Der Begriff der thermischen Behaglichkeit beschreibt jene Eigenschaften eines Wohn- oder Arbeitsraumes, bei denen der Organismus eines normalen Menschen die geringsten thermoregulatorischen Aufwendungen vornehmen muss (z. B. Schwitzen oder Frieren). Weiter liegt im Idealfall ein Wohlbefinden einer einzelnen Person vor, was bedeutet, dass es weder zu kalt noch zu warm ist. Das hierfür notwendige Wärmebilanzmodell muss die Randbedingungen definieren. Diese sehr subjektiven Anforderungen sind häufig von der persönlichen Konstitution sowie vom Geschlecht, Alter und anderen Faktoren abhängig. Somit lässt sich die thermische Behaglichkeit nicht einfach quantifizieren. In der Folge hat eine Vielzahl von Studien und Veröffentlichungen dieses Thema aufgegriffen. Am häufigsten werden heute die Studien von Prof. Povl Ole Fanger (z. B. Fanger 1973; 1982; Fanger et al. 1980; 1985; 1988; Ostergaard et al., 1974) verwendet. Fanger (1973) entwickelte die Behaglichkeitsgleichung aus denen der PMV- und PPD-Index abgeleitet werden kann. Beim PMV-Index (**P**redicted **M**ean **V**oting, „erwartete mittlere Beurteilung“) steht für eine einfache, durch eine grosse Personengruppe durchgeführte Klimabewertung eines Raumes. Der PMV-Index kann anhand der Gleichung:

$$PMV = [0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot M) - 0.028] \quad \text{Gleichung 5}$$

bestimmt werden. M steht für Energieumsatz in  $W \cdot m^{-2}$ . Weiter soll an dieser Stelle nicht auf die Berechnung eingegangen werden. Für die detaillierte Berechnung sei auf die Schweizer Norm SN EN ISO 7730 (2006) verwiesen. In die Berechnung fliessen körperliche Aktivität, Bekleidung, Luftfeuchte, -temperatur und -geschwindigkeit, die Temperatur von Boden, Decke und Wänden sowie die Strahlungsasymmetrien mit ein. Nach Fanger (1973) ergibt sich aus der Analyse eine Zuordnung zu einer einfachen Beurteilungstabelle für das Raumklima. (Tabelle 2).

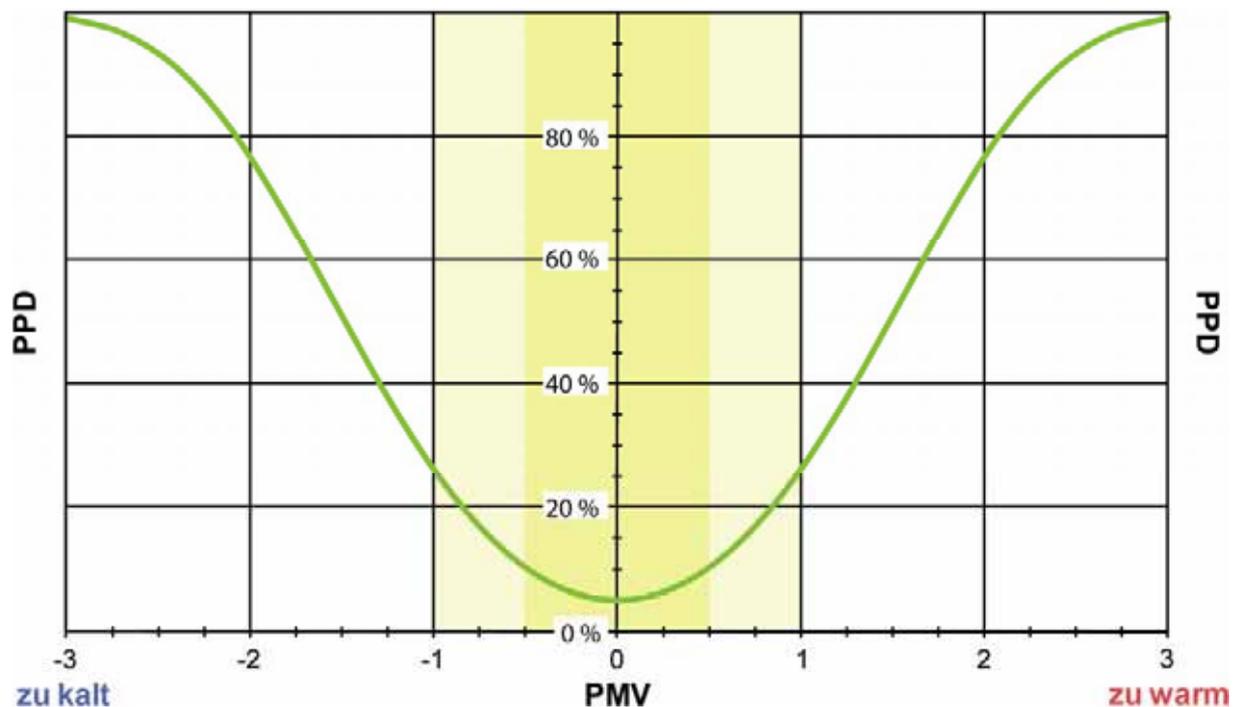
Bewertung PMV	Beschreibung
- 3	kalt
- 2	kühl
- 1	etwas kühl
0	ideal
+ 1	etwas warm
+ 2	warm
+ 3	heiss

**Tab. 2:** Siebenstufige PMV-Klimabeurteilungsskala nach Fanger (1973)

Ist der PMV-Index bekannt, so kann der PPD-Index (**P**redicted **P**ercentage **D**issatisfied, „Prozentsatz der mit dem Klima unzufriedenen“) mit der Gleichung:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \quad \text{Gleichung 6}$$

ermittelt werden. Der PPD-Index bezieht sich auf jenen Prozentsatz der Nutzer eines Raumes, welche mit den bestehenden raumklimatischen Verhältnissen unzufrieden sind. PMV und PPD stehen in direktem Bezug zueinander und können ineinander überführt werden (Abb. 11).



**Abb. 11:** PPD als Funktion des PMV. Der hellgelb hinterlegte Bereich repräsentiert die Mindestanforderung an den PMV. Das schmalere dunkelgelbe Feld stellt den angestrebten PMV-Wertebereich dar. PPD = vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen [%], PMV = vorausgesagtes mittleres Votum. Die Bewertung des PMV ist in Tab. 2 beschrieben.

Mit dem PPD-Index kann aus einer grossen Gruppe die Anzahl der Personen vorausgesagt werden, welche mit dem Umgebungsklima unzufrieden sind. Der Rest der Gruppe wird das Raumklima als klimatisch ideal (0), etwas warm (+1) oder etwas kühl (-1) empfinden. Für den Referenzraum werden die von der

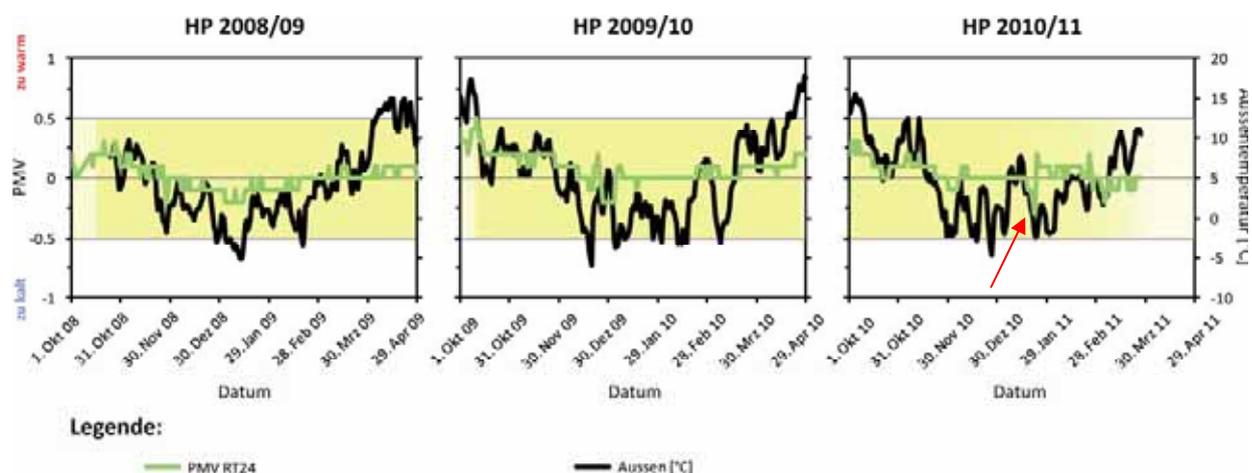
Deutschen Norm DIN EN 15251 (2007) empfohlenen Kriterien für das thermische Raumklima in geheizten bzw. gekühlten Gebäuden angewendet, d. h. der PPD-Index soll während des Heizens oder Kühlens <10 % sein, was einem PMV-Index von -0.5 bis 0.5 entsprechen würde (Abb. 11, dunkelgelbes Feld).

*Datengrundlage:* Analog zur Schweizer Norm SN EN ISO7730 (2006) wurde mit den Messdaten aus dem Referenzraum der PPD-Index berechnet. Als bekannte Eingangsparameter gehen die Lufttemperatur (Raum<sub>Ref</sub>, mittig in °C), die rel. Luftfeuchtigkeit (Raum<sub>Ref</sub>, mittig in %), der Energieumsatz (sitzende Tätigkeit im Büro, 70 Wm<sup>-2</sup>, dies entspricht einer metabolischen Einheit von 1.2 met) und der Isolationswert für die Bekleidung (Sommer: 0.080 m<sup>2</sup>•K/W, dies entspricht einer Kleidungseinheit von 0.50 clo; Winter: 0.155 m<sup>2</sup>•K/W, dies entspricht einer Kleidungseinheit von 1.00 clo). Für die mittlere Luftgeschwindigkeit wurde mit 0.1 m/s der typische Wert für Fussbodenheizungen angegeben. Für den Referenzraum wurde eine mittlere Strahlungstemperatur von 24 °C angenommen (± RT24).

Aufgrund der grossen Datenmenge wurden für eine gesamte Heiz- bzw. Kühlperiode Tagesmittelwerte gebildet. Dadurch werden die Gesamtdaten geglättet, d. h. wird im Winter kurzzeitig gelüftet, so kann der PMV kurzzeitig auf „kalt“ (Bewertung PMV = -3) fallen. Nach dem Schliessen der Fenster stieg die Temperatur jedoch wieder rasch an und demzufolge stieg der PMV in raumklimatisch günstigere Bereiche (PMV = -0.5 bis +0.5). Durch die Erstellung eines einzelnen Tageswertes werden kurzzeitige Schwankungen in der Temperatur ausgemittelt.

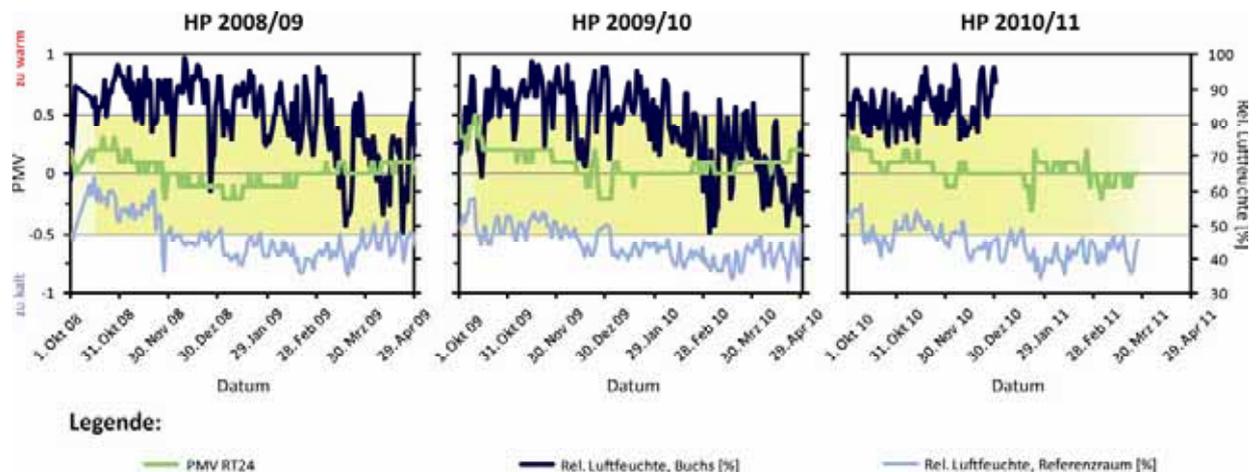
### 11.1 Zeitliche Entwicklung des PMV-Index während der Heizperiode (Okt. bis Apr.)

Die Auswertung des PMV-Indexes während der HP 2008/09, HP 2009/10 und HP 2010/11 (läuft noch) ergab, dass der Index immer nahe 0 (ideal) war. Die Werte pendelten in dem angestrebten Bereich zwischen -0.5 und 0.5 (Abb. 12, grüne Linie). Auch als es zu dem Heizungsausfall im Januar 2011 gekommen ist (vgl. Abb. 7, roter Pfeil) nahm der PMV-Index zwar abrupt ab, blieb aber dennoch im Bereich zwischen 0 und -1.5. Dies wird einerseits mit der raschen Instandsetzung der Heizung, andererseits mit der grossen energetischen Trägheit und guten Isolation des Bürogebäudes in Verbindung gebracht.



**Abb. 12:** PMV-Verlauf während der Heizphase (HP). Trotz der stark schwankenden Aussentemperatur (mittlere Tagestemperatur, schwarze Linie) bleibt der Verlauf des PMV-Indexes relativ stabil (grüne Linie). Das hellgelbe Feld stellt den angestrebten PMV zwischen -0.5 bis 0.5 dar. Der dunkelgelbe Bereich zeigt den effektiven Heizzeitraum, bei welchem die Wärmepumpe angeschaltet war. Aufgrund der besseren Lesbarkeit wurde die PMV-Skala nur für den angestrebten Wertebereich von -1 bis 1 angegeben.

Ergänzend wurde ein Vergleich zwischen der Entwicklung des PMV-Indexes in Bezug zur rel. Luftfeuchtigkeit ausserhalb und innerhalb des Gebäudes durchgeführt. Die Messdaten für die Region Aarau wurden von MeteoSchweiz in Buchs (Station Buchs/Aarau, 2.2 km ENE von der Forschungsanlage entfernt) erhoben. Aus Abbildung 13 geht hervor, dass die rel. Luftfeuchte im Referenzraum mit der rel. Luftfeuchte von der Umgebung des Bürogebäudes nicht korreliert. Das bedeutet, dass das Raumklima im Referenzraum von der lokalen klimatischen Entwicklung in und um Aarau abgekoppelt ist und eine eigene Entwicklung erfährt. Gleiches gilt dann natürlich auch für die Entwicklung des PMV-Indexes.



**Abb. 13:** Zusammenhang zwischen PMV-Index und rel. Luftfeuchte im Referenzraum sowie ausserhalb des Gebäudes. Die Messwerte der rel. Luftfeuchtigkeit ausserhalb des Gebäudes stammen von der MeteoSchweiz Wetterstation Buchs/Aarau (2.2 km ENE von der Forschungsanlage, dunkelblaue Linie). Während der Heizperiode (HP) besteht kein direkter Zusammenhang zwischen dem PMV-Index und der rel. Luftfeuchtigkeit ausserhalb des Gebäudes. Das hellgelbe Feld stellt den angestrebten PMV zwischen -0.5 bis 0.5 dar. Der dunkelgelbe Bereich zeigt den effektiven Heizzeitraum bei welchem die Wärmepumpe angeschaltet war. Aufgrund der besseren Lesbarkeit wurde die PMV-Skala nur für den angestrebte Wertebereich von -1 bis 1 angegeben.

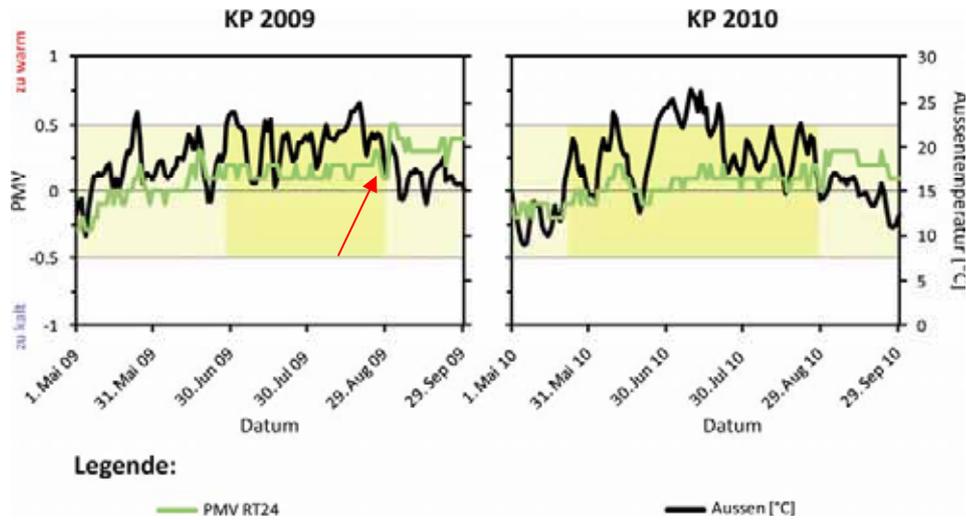
## 11.2 Zeitliche Entwicklung des PMV- und PPD-Index während der Kühlperiode (Mai bis Sept.)

Die Kühlperiode ist im Gegensatz zu einer Heizperiode nicht nur deutlich kürzer sondern zudem häufiger unterbrochen, d. h. während kühleren Wetterphasen, bei bedecktem Himmel oder längeren Regenphasen wird nicht zwangsläufig gekühlt. Daneben ist während der Kühlperioden die im Referenzraum gemessene Luftfeuchtigkeit höher als zu den Zeiten, in denen geheizt wird.

Wird gekühlt, so wurde die tägliche Lüftung ausschliesslich am Morgen – also zu Beginn der Büroarbeitszeit – und am Mittag während der Mittagspause durchgeführt. Nur in Zeiten ohne Kühlbetrieb blieb es dem jeweiligen Mitarbeiter selbst überlassen, ob und wann gelüftet wurde. In diesem Kontext ist möglicherweise der relativ unruhige Verlauf des PMV vor dem eigentlichen effektiven Kühlen zu sehen (Abb. 14, links). Erst mit dem eigentlichen Beginn des Freecoolings stabilisiert sich der PMV-Index.

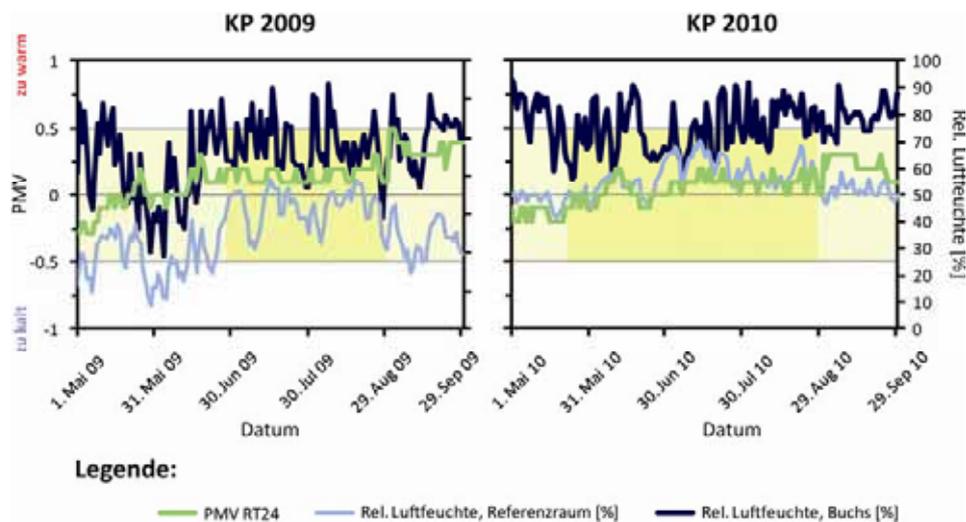
Die Auswertung von KP 2009 und KP 2010 hat gezeigt, dass der PMV-Index relativ stabil zwischen 0 und 0.25 gehalten wurde (Abb. 14 und 15). Einzig der relativ starke Warm/Kalt-Wechsel zwischen dem 10. Juni und 20. Juni 2010 hatte im PMV-Index einen relativ starken positiven bzw. negativen Ausschlag zur

Folge. Nach dem 20. Juni 2010 stiegen die Aussentemperaturen auf höhere Werte als während der KP 2009. Dank des eingeschalteten Freecoolings wurde der PMV-Index trotz dieses Anstiegs stabil im angestrebten PMV-Bereich gehalten (Abb. 14, rechts).



**Abb. 14:** PMV-Verlauf während der Kühlphase (KP). Das hellgelbe Feld stellt den angestrebten PMV zwischen -0.5 bis 0.5 dar. Der dunkelgelbe Bereich zeigt den effektiven Zeitraum des Freecoolings. Aufgrund der besseren Lesbarkeit wurde die PMV-Skala nur für den angestrebten Wertebereich von -1 bis 1 angegeben.

Aus Abbildung 14 geht nicht hervor, warum der PMV-Index am Ende des effektiven Zeitraums des Freecoolings so abrupt auf 0.5 angestiegen ist (siehe roter Pfeil). Das Ergebnis überrascht insofern, da die Aussentemperaturen gleichzeitig gefallen sind. Dadurch wurde auch das Kühlsystem nicht mehr automatisch eingeschaltet. Die weitere Auswertung belegt, dass der PMV-Anstieg mit dem Anstieg der rel. Luftfeuchte im Referenzraum in Verbindung steht. Und dieser Anstieg wiederum hängt mit dem Öffnen der Fenster während des Stillstandes der Kühlanlage zusammen. Als die rel. Feuchte im Bereich von Aarau signifikant angestiegen ist, stieg analog dazu auch die rel. Raumfeuchte. Dieser wetterbedingte Anstieg ist der Grund für den plötzlichen Anstieg des PMV-Indexes am Ende des effektiven Kühlens während der KP 2009 (Abb. 15, links).



**Abb. 15:** PMV-Verlauf während der Kühlphase (KP). Das hellgelbe Feld stellt den angestrebten PMV zwischen -0.5 bis 0.5 dar. Der dunkelgelbe Bereich zeigt den effektiven Zeitraum des Freecoolings. Aufgrund der besseren Lesbarkeit wurde die PMV-Skala nur für den angestrebten Wertebereich von -1 bis 1 angegeben.

## 12. PUMPENLAUFZEITEN

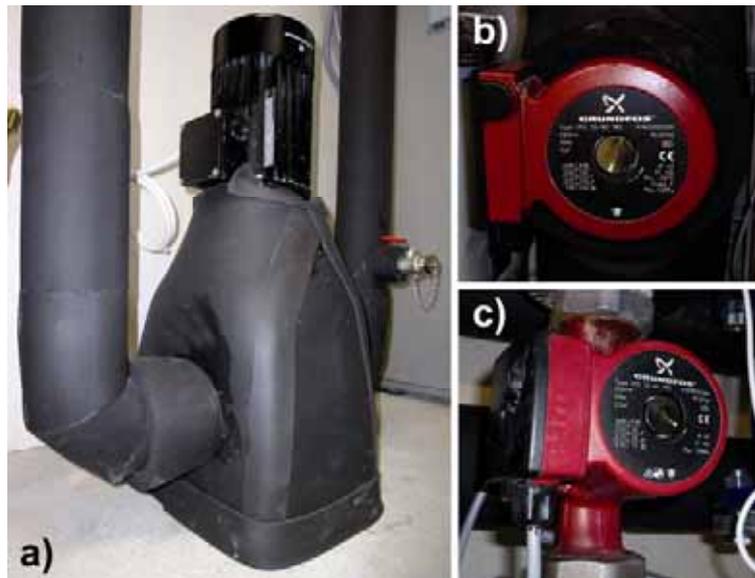
Der grösste Stromverbraucher im System ist die Wärmepumpe (Beilage 8). Daneben laufen diverse weitere grössere und kleinere Pumpen (Abb. 16). Für eine energetische Betrachtung müssen die Verbrauchswerte und Laufzeiten dieser Stromverbraucher bekannt sein. Die Betriebsstunden der Verbraucher im System zeigen an, wie lange welcher Verbraucher pro Monat in Betrieb ist. Es wurden sowohl die Betriebsstunden als auch sämtliche im Heizsystem befindliche Pumpenlaufzeiten aufgezeichnet (Tabelle 3).

Die SIA384/6 (2010) geht von einer Jahresbetriebszeit (Volllastzeit) von 1850 Betriebsstunden der Wärmepumpe (WP) unter Normbedingungen aus.

Generell stellt die effektive Jahresbetriebszeit das Resultat der Faktoren Standort, den energetischen Eigenschaften des zu heizenden Gebäudes, den Heizgewohnheiten seiner Bewohner, dem Warmwasserbedarf, temporären Faktoren (kalter bzw. warmer Winter) etc. dar. Demnach nehmen viele, zum Teil variable Faktoren Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes.

Im Jahr 2009 lief die WP 1025.8 h und 2010 über einen Zeitraum von 1043.1 h. Damit blieb die effektive Jahresbetriebszeit deutlich unter der prognostizierten bzw. von der SIA384/6 (2010) vorgeschlagenen WP-Betriebsstundenzeit. Für die relativ geringe Laufzeit werden mehrere Einflussgrössen verantwortlich gemacht: Einerseits wurde das Gebäude relativ gut isoliert, andererseits wurde am Standort ein erhöhter geothermischer Gradient von 0.06 K/m bestimmt (Beilage 6). Der erhöhte geothermische Wärmefluss impliziert eine höhere Leistungsfähigkeit der installierten Erdwärmesonden.

Eine weitere wichtige Einflussgrösse ist das Wetter im beobachteten Zeitraum. Alle drei Winter waren im Durchschnitt wärmer als die langjährigen Mittel (Abb. 1 & 4). Natürlich muss ein gut isoliertes Gebäude während eines milden Winters eher wenig geheizt werden. Daneben sind die Erdwärmesonden für die derzeitige Nutzung eher überdimensioniert. Dies hängt damit zusammen, dass durch relativ einfache Umbaumaassnahmen aus dem Bürogebäude ein Wohnhaus mit bis zu drei Appartements pro Stockwerk realisiert werden kann. In diesem Fall ist der Energiebedarf für Heizung bzw. Brauchwarmwasser höher als bei der derzeitigen Nutzung als Bürogebäude.



**Abb. 18:** Auswahl der im Heizungssystem der Heizanlage befindlichen Grundfos-Pumpen: A) Primärpumpe, MOT-MG80A2-19FT 100-C; B) Kühlpumpe, UPS 32-80 180 mm; C) Ladepumpe, UPS 32-60 180 mm.

	Monat	WP [h]	PP [h]	LP [h]	HZP [h]	BWP [h]	KP [h]
Heizen	Nov. 08	146.0	149.8	161.3	720.0	-	0.0
	Dez. 08	202.1	206.5	232.4	743.7	-	0.0
	Jan. 09	234.2	238.6	259.8	742.7	-	0.0
	Feb. 09	172.5	176.4	197.7	672.0	-	0.0
	Mrz. 09	138.2	141.5	154.8	743.0	-	0.0
	Apr. 09	45.5	46.8	47.0	711.0	-	0.0
Kühlen	Mai. 09	22.7	23.4	23.6	552.0	-	0.0
	Jun. 09	17.4	18.0	18.0	385.4	-	63.2
	Jul. 09	19.7	20.4	20.4	301.2	-	277.0
	Aug. 09	10.9	11.4	16.0	231.0	-	256.8
	Sep. 09	4.4	4.9	4.8	1.7	9.1	9.5
Heizen	Okt. 09	78.8	81.4	87.8	547.6	23.3	0.0
	Nov. 09	108.4	111.7	120.5	720.0	5.5	0.0
	Dez. 09	173.2	177.3	200.4	744.0	6.7	0.0
	Jan. 10	220.1	224.7	250.1	744.0	6.3	0.0
	Feb. 10	163.3	167.0	186.7	672.0	6.9	0.0
	Mrz. 10	132.9	136.1	150.2	739.0	6.1	0.0
	Apr. 10	64.0	65.7	69.6	584.8	5.4	1.1
Kühlen	Mai. 10	39.5	40.5	42.0	16.1	5.2	16.1
	Jun. 10	4.3	4.5	4.6	129.8	4.6	129.8
	Jul. 10	4.1	4.2	4.4	269.3	4.4	269.3
	Aug. 10	3.9	4.0	4.2	51.0	4.2	51.0
	Sep. 10	15.4	15.8	16.4	0.1	4.7	0.0
Heizen	Okt. 10	89.2	91.5	96.0	715.0	5.1	0.0
	Nov. 10	105.3	107.6	119.6	720.0	5.1	0.0
	Dez. 10	201.2	205.0	219.8	743.9	7.3	0.0
	Jan. 11	184.9	188.2	198.6	741.6	6.6	0.0
	Feb. 11	158.3	161.2	170.6	672.0	5.7	0.0
	Mrz. 11	100.0	102.0	105.7	656.0	5.0	0.0

**Tab. 3:** Die Betriebsstunden aller wesentlichen Pumpen. WP = Wärmepumpe, PP = Primärpumpe, LP = Ladepumpe, HZP = Heizpumpe, BWP = Brauchwasserpumpe, KP = Kühlpumpe. Die Daten vom Mrz. 11 wurden bis einschliesslich 22. März 2011 ausgewertet. Durch einen technischen Defekt wurden die Laufzeiten der Brauchwasserpumpe erst ab August 2009 aufgezeichnet.

## 13. PUMPENENERGIEN

Anhand der Pumpenlaufzeiten und des spezifischen Energieverbrauchs einer einzelnen Pumpe kann der Verbrauch an elektrischer Energie berechnet werden. Für alle im System befindlichen Pumpen wurde die Berechnung des Energieverbrauchs monatsweise durchgeführt (Tab. 4). Der Energieverbrauch der Brauchwasserpumpe (BWP) konnte für die Monate vom Nov. 08 bis Aug. 09 nicht ermittelt werden (vgl. Kap. 12).

	Monat	WP [kWh]	PP [kWh]	LP [kWh]	HZP [kWh]	BWP [kWh]	KP [kWh]	el. Energie, gesamt [kWh]
Heizen	Nov. 08	1306.9	112.3	11.3	90.0	-	0.0	1520.5
	Dez. 08	1808.6	154.8	16.3	93.0	-	0.0	2072.7
	Jan. 09	2095.9	179.0	18.2	92.8	-	0.0	2386.0
	Feb. 09	1543.6	132.3	13.8	84.0	-	0.0	1773.7
	Mrz. 09	1237.0	106.2	10.8	92.9	-	0.0	1446.8
	Apr. 09	407.7	35.1	3.3	88.9	-	0.0	535.0
Kühlen	Mai. 09	203.6	17.6	1.6	69.0	-	0.0	291.8
	Jun. 09	155.7	13.5	1.3	48.2	-	12.6	231.3
	Jul. 09	176.1	15.3	1.4	37.7	-	55.4	285.9
	Aug. 09	97.6	8.6	1.1	28.9	-	51.4	187.5
	Sep. 09	39.2	3.6	0.3	0.2	1.8	1.9	47.1
Heizen	Okt. 09	705.1	61.0	6.1	68.5	4.7	0.0	845.4
	Nov. 09	969.8	83.8	8.4	90.0	1.1	0.0	1153.1
	Dez. 09	1549.9	133.0	14.0	93.0	1.3	0.0	1791.3
	Jan. 10	1969.5	168.6	17.5	93.0	1.3	0.0	2249.9
	Feb. 10	1461.8	125.3	13.1	84.0	1.4	0.0	1685.5
	Mrz. 10	1189.4	102.1	10.5	92.4	1.2	0.0	1395.6
Kühlen	Apr. 10	572.4	49.3	4.9	73.1	1.1	0.2	701.0
	Mai. 10	353.1	30.3	2.9	2.0	1.0	3.2	392.7
	Jun. 10	38.9	3.3	0.3	16.2	0.9	26.0	85.6
	Jul. 10	36.8	3.2	0.3	33.7	0.9	53.9	128.7
	Aug. 10	35.3	3.0	0.3	6.4	0.8	10.2	56.0
Heizen	Sep. 10	138.1	11.9	1.1	0.0	0.9	0.0	152.0
	Okt. 10	798.5	68.6	6.7	89.4	1.0	0.0	964.2
	Nov. 10	942.0	80.7	8.4	90.0	1.0	0.0	1122.2
	Dez. 10	1800.3	153.7	15.4	93.0	1.5	0.0	2063.9
	Jan. 11	1654.9	141.2	13.9	92.7	1.3	0.0	1904.0
	Feb. 11	1416.7	120.9	11.9	84.0	1.1	0.0	1634.7
Mrz. 11	895.0	76.5	7.4	82.0	1.0	0.0	1061.9	

**Tab. 4:** Die Betriebsstunden aller wesentlichen Pumpen. WP = Wärmepumpe, PP = Primärpumpe, LP = Ladepumpe, HZP = Heizpumpe, BWP = Brauchwasserpumpe, KP = Kühlpumpe. Die Daten vom Mrz. 11 wurden bis einschliesslich 22. März 2011 aufgezeichnet.

## 14. EFFEKTIVER WÄRMEENTZUG AUS DEN SONDEN

Um eine genaue Vorstellung darüber zu bekommen, welche Energiemengen aus dem Boden entnommen wurden und wie viel an elektrischer Energie zusätzlich aufgebracht werden musste um das Gebäude schlussendlich mit Wärme zu versorgen wurden mehrere Wärmehähler installiert. Ein Zähler wurde vor der Wärmepumpe – also im glykolhaltigen Primärkreislauf – installiert. Dieser Wärmehähler wurde mit einem Glykolrechenwerk (25 % Glykol / 75 % Wasser) ausgestattet. Ein weiterer Wärmehähler wurde direkt nach der Wärmepumpe in den hydraulischen Primärkreislauf eingebaut. Dadurch wurde es möglich, die aus dem Glykolkreislauf entnommene Wärmemenge zu bestimmen. An den Zählern wurden im Nov. 08 letzte Installationsarbeiten vorgenommen. Aus diesem Grunde konnte erst ab Dez. 08 mit der energetischen Auswertung begonnen werden (Tab. 5).

	Monat	Energie aus EWS [kWh]	Energie nach WP [kWh]
Heizen	Dez. 08	6890.2	9360.0
	Jan. 09	7708.0	10630.0
	Feb. 09	5781.0	7920.0
	Mrz. 09	4742.3	6440.0
	Apr. 09	1626.2	2180.0
Kühlen	Mai. 09	808.4	1100.0
	Jun. 09	639.2	850.0
	Jul. 09	874.2	980.0
	Aug. 09	629.8	550.0
	Sep. 09	85.8	126.8
Heizen	Okt. 09	2932.7	3717.5
	Nov. 09	3956.0	5124.6
	Dez. 09	5700.1	7505.2
	Jan. 10	6681.6	9108.2
	Feb. 10	5030.1	6866.7
	Mrz. 10	4347.6	5731.4
	Apr. 10	2244.8	2868.1
Kühlen	Mai. 10	1419.2	1760.7
	Jun. 10	147.8	170.9
	Jul. 10	143.6	169.1
	Aug. 10	135.1	156.8
	Sep. 10	564.5	687.4
Heizen	Okt. 10	3181.6	4006.6
	Nov. 10	3556.4	4578.0
	Dez. 10	6024.7	8253.9
	Jan. 11	5380.7	7305.5
	Feb. 11	4670.1	6291.5
Mrz. 11	3180.2	4161.4	

**Tab. 5:** Entnommene Energie aus den Erdwärmesonden, gewonnene Energie nach der Wärmepumpe. Weitere Erläuterungen im Text.

Aus Tabelle 5 geht hervor, dass im Aug. 09 nicht korrekte Werte gemessen wurden (in rot markiert). Dies ist auf zwei Ursachen zurückzuführen: Das motorgesteuerte 3-Wege-Ventil zwischen Wärmepumpe und Brauchwasser- bzw. Heizungsspeicher war in dieser Zeit defekt (vgl. Beilage 7). Beim Austausch des Ventils wurde zudem festgestellt, dass das Rückschlagventil zwischen Sondenverteiler und Wärmepumpe ebenfalls nicht richtig funktionierte. Beide Geräte wurden noch im Aug. 08 ersetzt.

Die energetische Auswertung zeigt den genauen monatlichen Verlauf des Energiebedarfs des Bürogebäudes über das Jahr hinweg. Erwartungsgemäss nimmt der Energiebedarf im Sommer stark ab. Vergleicht man allerdings den Energiebedarf zwischen der Kühlphase 2009 und 2010, so fällt der deutlich geringere Energiebedarf in 2010 auf. Die Ende 2009 durchgeführten Optimierungsmassnahmen sowie das sommerliche Umstellen der Wärmepumpe auf die ausschliessliche Herstellung von Brauchwarmwasser war demnach erfolgreich (vgl. Kap. 8). Durch diese Massnahmen sank in den Monaten Juni und Juli die benötigte Energie von 1830.0 kWh auf 339.1 kWh.

## 15. EFFEKTIVER WÄRMEEINTRAG IN DIE SONDEN

Ein Ziel des Forschungsvorhabens war die Quantifizierung der durch das Freecooling in die EWS eingebrachte Energiemenge. Hierfür wurde ein eigener Wärmezähler in den Primärkreislauf eingebaut (Beilage 7). Trotz anfänglicher Probleme (z. B. Stillstandszeit im Aug. 09, siehe Tab. 5) wurde in beiden Kühlsaisons überschüssige Wärme aus dem Bürogebäude über die Sonden in den Untergrund transportiert (Tab. 6).

	Monat	Energie in EWS [kWh]
Kühlen 2009	Mai. 09	0.0
	Jun. 09	0.0
	Jul. 09	1851.8
	Aug. 09	2491.0
	Sep. 09	103.4
Kühlen 2010	Mai. 10	28.1
	Jun. 10	789.7
	Jul. 10	1916.0
	Aug. 10	412.1
	Sep. 10	0.0

**Tab. 6:** In den Sommermonaten 2009 und 2010 wurde überschüssige Gebäudewärme in die Sonden eingebracht. Weitere Erläuterungen im Text.

Damit wurden im Sommer 2009 mehr als 4446 kWh und 2010 fast 3146 kWh über die Erdwärmesonden eingebracht. Die zusätzlich eingebrachte Wärme verkürzte einerseits die Regenerationszeit des durch die vorangegangene Heizperiode abgekühlten Untergrunds, andererseits wird durch das wärmere Sondenfluid der COP der Wärmepumpe verbessert. Dadurch wird deutlich weniger Energie für die Herstellung des sommerlichen Brauchwarmwassers benötigt (vgl. Beilagen 10 bis 37).

## 16. JAHRESARBEITSZAHL (JAZ) UND LEISTUNGSZAHL (COP)

### Die Begriffe JAZ und COP

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) ist ein Bewertungskriterium für die Effizienz der gesamten Heizungsanlage. Für die Ermittlung der JAZ wird die jährliche Menge an hergestellter Wärme (Heizung und Warmwasser) ins Verhältnis zur eingesetzten Energiemenge (z. B. elektrischer Strom für Wärmepumpe, Primärpumpe etc.) gesetzt. Damit lassen sich auch Rückschlüsse für die durch die Stromerzeugung entstandenen Emissionen (Kohlendioxid) ziehen (siehe folgendes Kap.). Über das Jahr gesehen kann die JAZ im Sommer anders als im Winter sein. Zur genaueren Analyse wurden deshalb monatliche JAZ-Werte berechnet (Beilagen 10 bis 37).

Die Leistungszahl einer Wärmepumpe wird als COP (Coefficient Of Performance) bezeichnet. Sie ist das Verhältnis von erzeugter Wärmeleistung zu zugeführter elektrischer Energie für die Verdichterleistung in der Wärmepumpe. Die COP – und damit die Energieeffizienz – ist umso höher, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der Wärmesenke und der Nutztemperatur ist. Laut Hersteller wird für die Forschungsanlage ein COP von 4.1 (B0/W35) angegeben. Effektiv war die Temperaturdifferenz deutlich geringer. Insbesondere in den Sommermonaten, war durch das Freecooling das Sondenfluid erwärmt, wodurch der COP über dem vom Hersteller angegebenen Wert lag.

*Ergebnisse:* Die monatliche Berechnung der COP (nur WP) ergab, dass die Wärmepumpe mit einem Wert zwischen 3.2 (Sept. 09) und 5.6 (Juli 09) betrieben wurde (Tab. 7). Werden alle Energieverbraucher betrachtet, so schwankt der monatliche JAZ-Wert der gesamten Anlage zwischen 3.1 (Sept. 09) und 9.3 (Juli 09). Dabei sollte allerdings berücksichtigt werden, dass im September 2009 verschiedene Umbauten durchgeführt werden mussten (siehe Kap. 14). Der berechnete JAZ-Wert während des Kühlens ist aufgrund des sehr geringen Energieverbrauchs (es läuft nur die Kühlpumpe) deutlich höher.

	Monat	COP (nur WP)	JAZ (monatlich)	JAZ (kühlen)
Heizen	Dez. 08	5.2	3.8	-
	Jan. 09	5.1	3.6	-
	Feb. 09	5.1	3.7	-
	Mrz. 09	5.2	3.8	-
	Apr. 09	5.3	3.9	-
Kühlen	Mai. 09	5.4	3.8	-
	Jun. 09	5.5	4.0	-
	Jul. 09	5.6	9.3	19.9
	Aug. 09	5.6	-6.9	31.0
	Sep. 09	3.2	3.1	49.0
Heizen	Okt. 09	5.3	4.7	-
	Nov. 09	5.3	4.4	-
	Dez. 09	4.8	4.2	-
	Jan. 10	4.6	3.8	-
	Feb. 10	4.7	3.7	-
	Mrz. 10	4.8	4.1	-
	Apr. 10	5.0	4.6	-
Kühlen	Mai. 10	5.0	5.2	5.4
	Jun. 10	4.4	7.4	18.7
	Jul. 10	4.6	6.6	21.9
	Aug. 10	4.4	7.2	24.9
	Sep. 10	5.0	5.6	-
Heizen	Okt. 10	5.0	4.9	-
	Nov. 10	4.9	4.5	-
	Dez. 10	4.6	3.7	-
	Jan. 11	4.4	3.8	-
	Feb. 11	4.4	3.9	-
	Mrz. 11	4.6	4.2	-

**Tab. 7:** Entwicklung des COP, der JAZ (monatlich) sowie die JAZ während des Freecoolings. Die Ergebnisse vom Aug. 09 wurden nicht weiter berücksichtigt (siehe Kap. 14). Weitere Erläuterungen im Text.

## 17. CO<sub>2</sub>-EINSPARUNG

Die genaue Quantifizierung des eingesparten bzw. ausgestossenen Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) ist schwierig. Schliesslich wurde für Erstellung und Transport der Komponenten wie Wärmepumpe, Rohrleitungen, für die Realisierung der drei 225 m tiefen Bohrlöcher etc. ebenfalls CO<sub>2</sub> freigesetzt. Trotzdem soll versucht werden, zumindest die für die jährlich benötigte Heizenergie, CO<sub>2</sub>-Äquivalente zu berechnen. Hierfür werden folgende Annahmen für die Eigenschaften von Heizöl gemacht:

<b>Annahmen / Definitionen</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>
Dichte Heizöl	0.86	kg/l
Heizwert (pro kg)	11.8	kWh/kg
Heizwert (pro l)	10.148	kWh/l
CO <sub>2</sub> aus Heizölverbrennung	2.65	kg/l

**Tab. 8:** Eigenschaften von Heizöl

Die Messergebnisse von Kap. 14 zeigten, dass in den Jahren 2009 und 2010 im Mittel etwa 45'700 kWh/a Wärme für Heizung und Brauchwarmwasser benötigt wurden. Würde man diese Energiemenge mit Heizöl erzeugen, so werden dafür alleine 4503 l Heizöl pro Jahr benötigt. Dies würde eine CO<sub>2</sub>-Emission von etwa 11'933 Tonnen pro Jahr entsprechen. Und hierbei ist der resultierende Systemwirkungsgrad einer Ölheizung mit Warmwassererzeugung noch nicht berücksichtigt.

Für die verschiedenen Pumpen wird Strom benötigt. Bei einer mittleren JAZ von 4.5 ergibt sich ein Strombedarf von ca. 10'155 kWh pro Jahr. Für den Schweizer Strommix sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen gering (Quelle: <http://www.bfe.admin.ch/energie/00588/00589/00644/index.html?lang=de&msg-id=16105>). Derzeit besteht der Strom aus dem Schweizer Netz zu:

0.5 %	aus regenerativen Energiequellen
2.2 %	aus fossilen Energieträgern (Kohle, Öl, Erdgas)
2.9 %	aus Abfällen
21 %	von der Strombörse (davon ca. 8 % aus fossilen Energieträgern)
34 %	Wasser
41 %	Kernenergie

Damit ergibt sich ein fossiler Energieträgeranteil von ca. 13.1 % (fossile Energieträger aus Strombörse [8 %], fossile Energieträger selbst [2.2 %] und Abfälle [2.9 %]). Der Wirkungsgrad eines Kraftwerks mit fossilen Energieträgern wird mit 18 % angegeben. Damit würde alleine die Forschungsanlage in der General Guisan-Strasse 2 etwa 10 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr einsparen.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass hier ausschliesslich der CO<sub>2</sub>-Ausstoss berücksichtigt wurde. Der Ausstoss an Stickoxiden, Feinstaub etc. wurde hierbei ebenso wenig berücksichtigt wie mögliche Folgekosten durch die Kernenergie (z. B. Endlagerung).

## 18. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Studie hat gezeigt, dass drei EWS-Sonden von 225 m Länge ein 1000 m<sup>2</sup> grosses modernes Bürogebäude effizient beheizen und kühlen können. Beim Freecooling wird erwartungsgemäss im Bereich von 0 bis 125 m die meiste Wärmeenergie an den Gesteinsuntergrund abgegeben. Energetisch positiv wirkt sich das Freecooling nicht nur auf die Regeneration der Erdwärmesonden, sondern auch auf die Herstellung von Brauchwarmwasser im Sommer aus.

Es konnte belegt werden, dass in den durch Freecooling gekühlten Räumen kein Kondenswasser durch die Unterschreitung des Taupunktes entsteht. Während der 2 ½ jährigen Beobachtungsphase war die Bodentemperatur immer mindestens 4 °C über dem berechneten Taupunkt. Damit kann eine Feuchtbildung durch Kondensation praktisch ausgeschlossen werden.

Hinsichtlich des Wohn- und Arbeitsklimas hat sich gezeigt, dass die Kriterien für ein behagliches Wohnklima problemlos eingehalten wurden. Dies gilt für die Heiz- besonders aber auch für die Kühlphase. Damit ist eine mit Geothermie betriebene Gebäudeheizung und -kühlung eine optimale Lösung für die vollumfängliche Klimatisierung von Wohn-, Büro-, und sonstigen Arbeitsräumen.

## 19. LITERATUR

- Afjei, T., Dott, R., Huber, A. (2006). Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 270057, Bern, 76 Seiten.
- Bassetti, S., Rohner, E., Signorelli, S., Matthey, B. (2006). Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 260072, Bern, 65 Seiten.
- DIN EN 15251 (2007). Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 50 S.
- EBERHARD & Partner AG (2003). „Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer Erdwärmesondenanlage“ Otelfingen ZH. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 230184, Bern, 11 Seiten + 22 Beilagen.
- EBERHARD & Partner AG (2004a). Isolation von Erdwärmesonden – Zusammenstellung von bisherigen Erfahrungen. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 240147, Bern, Seiten 7+ Beilagen 8.
- EBERHARD & Partner AG (2004b). Wärmepumpen-Anlage Chestonag Automation AG, Seengen (AG). Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 240010, Bern, 16 Seiten + 25 Beilagen.
- EBERHARD & Partner AG (2005). Erdwärmesondenfeld Aarau – Heizen und Kühlen („Free-Cooling“) eines grossen Bürogebäudes mit teilweise wärmeisolierten Erdwärmesonden. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 250209, Bern, 18 Seiten + 40 Beilagen.
- EBERHARD & Partner AG (2009). Effizienz- und thermische Behaglichkeitsermittlung einer über den Fussboden wirkenden erdgekoppelten Heiz- und Kühlanlage in Aarau (Zwischenbericht), Bundesamt für Energie, Bern, 9 Seiten + 8 Beilagen.
- Fanger, P. O. (1973). Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill-Books, New York, 244 p.
- Fanger, P.O. (1982). Thermal Comfort. Robert E. Krieger publishing company, Malabar, 244 p.
- Fanger, P.O., Bánhidi, L., Olesen, B.W., Langkilde, G. (1980). Comfort limits for heated ceilings. ASHRAE Trans. 86 (2), 141-156.
- Fanger, P.O., Ipsen, B.M, Langkilde, G., Olesen, B.W., Christensen, N.K., Tanabe, S. (1985). Comfort limits for asymmetric thermal radiation. Energy and Buildings 8 (3), 225-236.

- Fanger, P.O., Melikov, A., Hanzawa, H. Ring, J. (1988). Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings* 12 (1), 21-39.
- Minder, R. (2010). Forschungsprogramm Geothermie – Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer 290168, Bern, 12 Seiten.
- Ostergaard, J., Fanger, P.O., Olesen, S., Madsen, T.L. (1974). The effect on man's comfort of a uniform airflow from different directions. *ASHRAE Trans.* 80 (2), 142-157.
- Sachs, O., Eberhard, M. (2009). Eine Erdwärmeheizung als Referenzanlage. *Geothermische Energie* 65, 16-18.
- SN EN ISO 7730 (2006). Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien zur lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005). SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 55 S.

Projektleitung: Dr. Oliver Sachs, Dr. Mark Eberhard

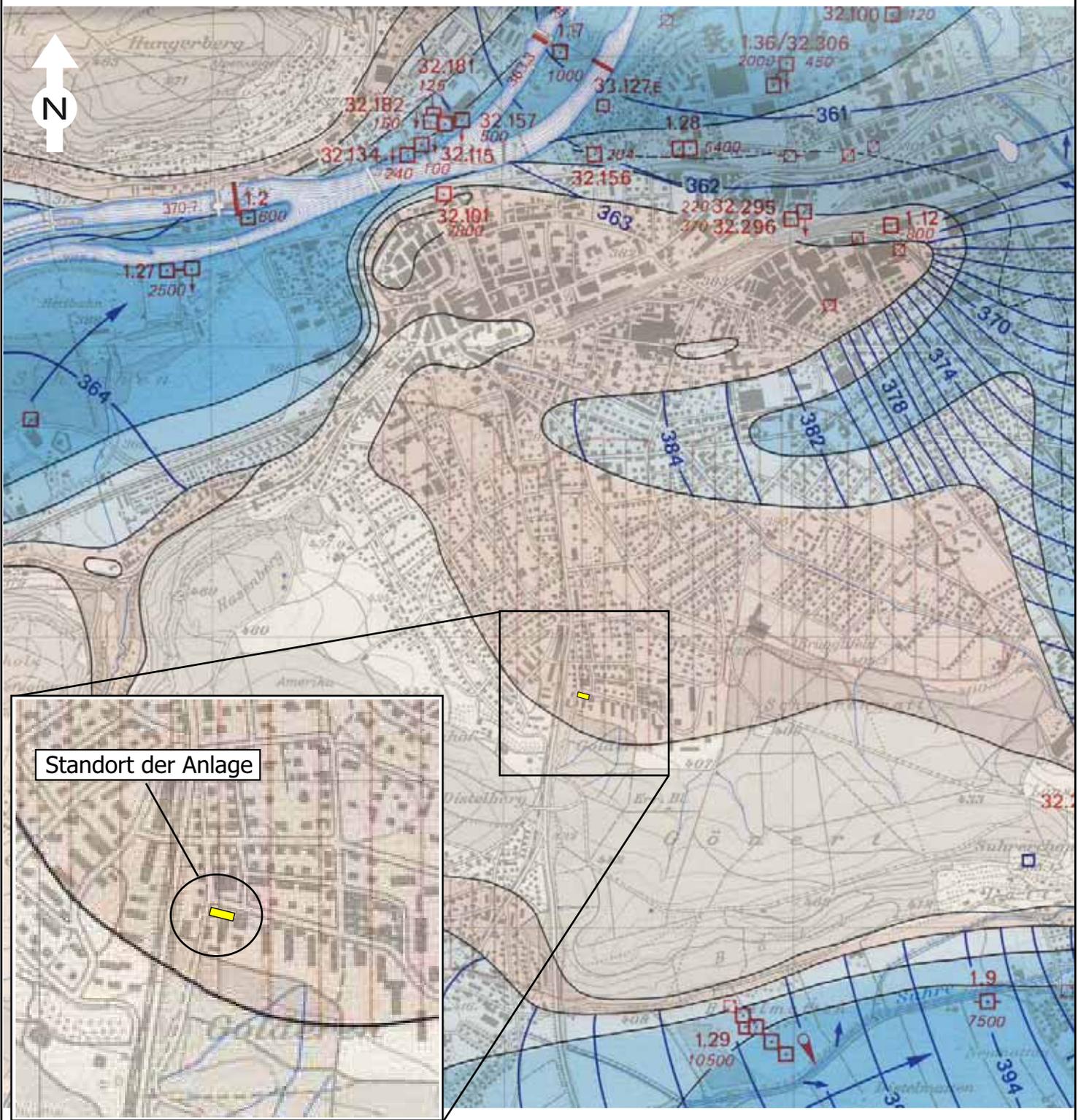
Aarau, 21. April 2011

EBERHARD & Partner AG  
Geologie • Energie • Umwelt

## 20. BEILAGEN

- 1 Ausschnitt aus der Grundwasserkarte des Kantons Aargau
- 2 Grundrissplan vom Untergeschoss des Bürogebäudes, General Guisan-Strasse 2 in Aarau
- 3 Erstellung der Forschungs-Erdwärmesonde
- 4 Fotodokumentation Bürogebäude General Guisan-Strasse 2 in Aarau
- 5 Geologisches Bohrprofil von Sonde 1
- 6 Thermal Response Test (TRT) der Erdwärmesonden und anfängliches Temperaturprofil
- 7 Prinzipschema der Wärmepumpenanlage und Messapparaturen
- 8 Fotodokumentation der Messapparaturen Heizanlage
- 9 Fotodokumentation der Messapparaturen Innenraum
- 10 Temperatur und Wärmebilanz im Dezember 2008
- 11 Temperatur und Wärmebilanz im Januar 2009
- 12 Temperatur und Wärmebilanz im Februar 2009
- 13 Temperatur und Wärmebilanz im März 2009
- 14 Temperatur und Wärmebilanz im April 2009
- 15 Temperatur und Wärmebilanz im Mai 2009
- 16 Temperatur und Wärmebilanz im Juni 2009
- 17 Temperatur und Wärmebilanz im Juli 2009
- 18 Temperatur und Wärmebilanz im August 2009
- 19 Temperatur und Wärmebilanz im September 2009
- 20 Temperatur und Wärmebilanz im Oktober 2009
- 21 Temperatur und Wärmebilanz im November 2009
- 22 Temperatur und Wärmebilanz im Dezember 2009
- 23 Temperatur und Wärmebilanz im Januar 2010
- 24 Temperatur und Wärmebilanz im Februar 2010
- 25 Temperatur und Wärmebilanz im März 2010
- 26 Temperatur und Wärmebilanz im April 2010
- 27 Temperatur und Wärmebilanz im Mai 2010
- 28 Temperatur und Wärmebilanz im Juni 2010
- 29 Temperatur und Wärmebilanz im Juli 2010
- 30 Temperatur und Wärmebilanz im August 2010
- 31 Temperatur und Wärmebilanz im September 2010
- 32 Temperatur und Wärmebilanz im Oktober 2010
- 33 Temperatur und Wärmebilanz im November 2010
- 34 Temperatur und Wärmebilanz im Dezember 2010
- 35 Temperatur und Wärmebilanz im Januar 2011
- 36 Temperatur und Wärmebilanz im Februar 2011
- 37 Temperatur und Wärmebilanz im März 2011

Ausschnitt aus der Grundwasserkarte des Kantons Aargau, Onlinedaten aus AGIS



Standort der Anlage

-  Bürogebäude mit geothermaler Forschungsanlage  
General Guisan-Strasse 2
-  Gebiet sehr grosser Grundwassermächtigkeit (> 20 m)
-  Gebiet grosser Grundwassermächtigkeit (10-20 m)
-  Gebiet mittlerer Grundwassermächtigkeit (2-10 m)
-  Gebiet geringer Grundwassermächtigkeit (< 2 m)
-  Grundwasserisohypse (m ü. M.) bei Mittelwasserstand
-  Gebiet geringer Grundwassermächtigkeit (< 2 m)  
Schotter-GW-Leiter über den Tälern
-  Grundwasserfassung mit Nummer und Entnahmemenge in l/min
-  Quelfassung (min./max in l/min)

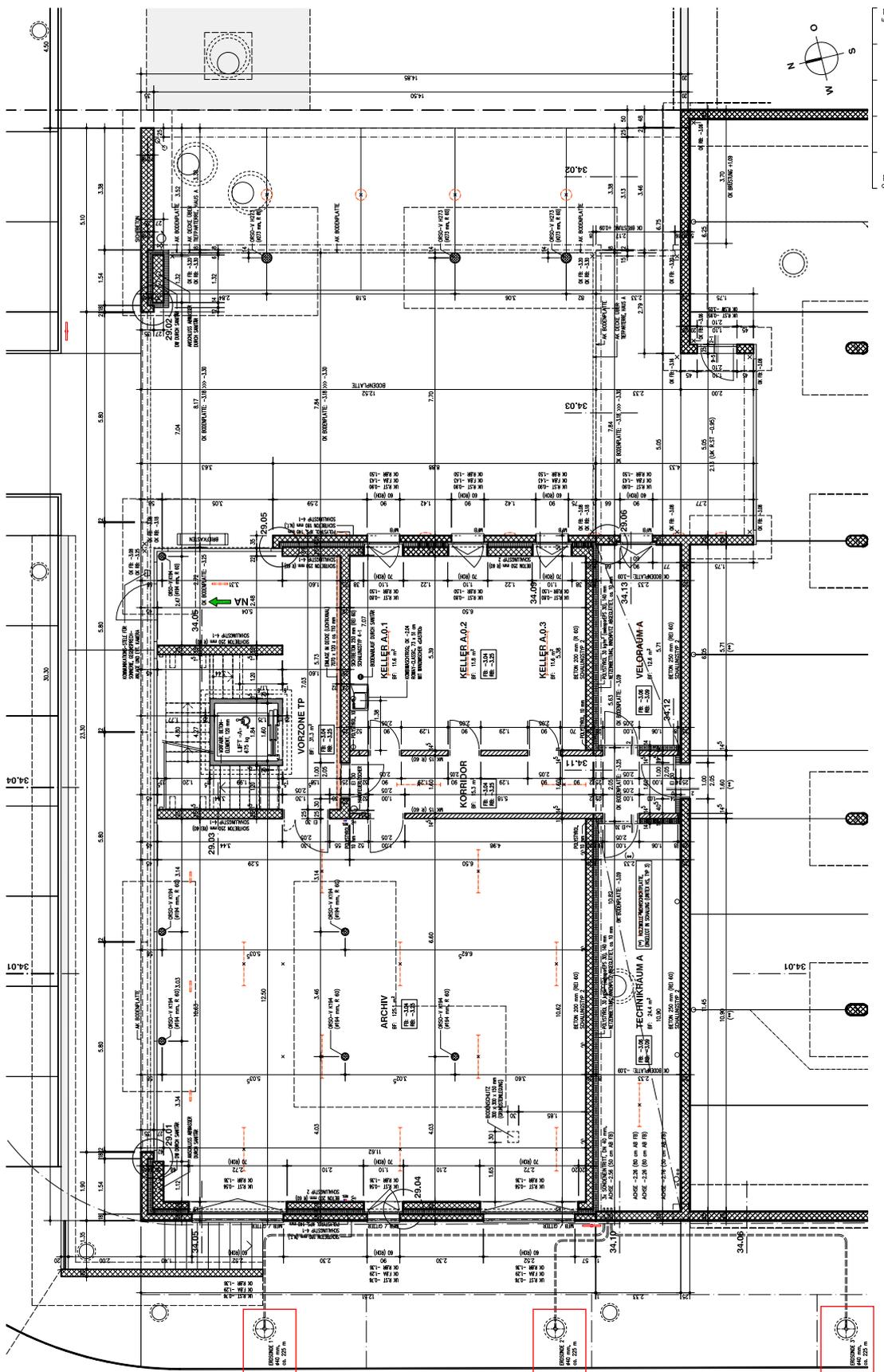
Grundrissplan vom Untergeschoss des Bürogebäudes, General Guisan-Strasse 2 in Aarau (AG)

lämmli\_architektur

Lämmli Architektur AG, Architekten SIA, Sengelbachweg 4, CH-5000 Aarau  
 aarau@laemmlich, www.laemmlich, Tel 062 636 88 36; Fax 062 636 88 35

PROJEKT 0316 Neubau Wohn- und Gewerbehäuser, General Guisan-Strasse, 5000 Aarau  
 BAUHERRSCHAFT A\_L\_M Projektmanagement AG, c/o Lämmli Architektur AG, Sengelbachweg 4, 5000 Aarau

Tiefparterre



ERD WÄRMESONDE 225 m TIEF  
 MIT T-FÜHLER AUF 50 m

ERD WÄRMESONDE 225 m TIEF  
 MIT T-FÜHLER AUF 125 m

ERD WÄRMESONDE 225 m TIEF  
 MIT T-FÜHLER AUF 225 m



Erstellung der Forschungs-Erdwärmesonde



Installation der Bohrstelle



Bohrtisch und Bohrgestänge beim Bohren einer Erdwärmesonde



Isolierung der Zu- und Ab-  
leitungen mit Tubolit

Eine der drei 225 m tiefen Erdwärmesonden



# Fotodokumentation Bürogebäude General Guisan-Strasse 2 in Aarau



Gebäudeansicht aus Nord-West



Gebäudeansicht aus Süd-West



Lage der Erdwärmesonden



Lage der Heizzentrale





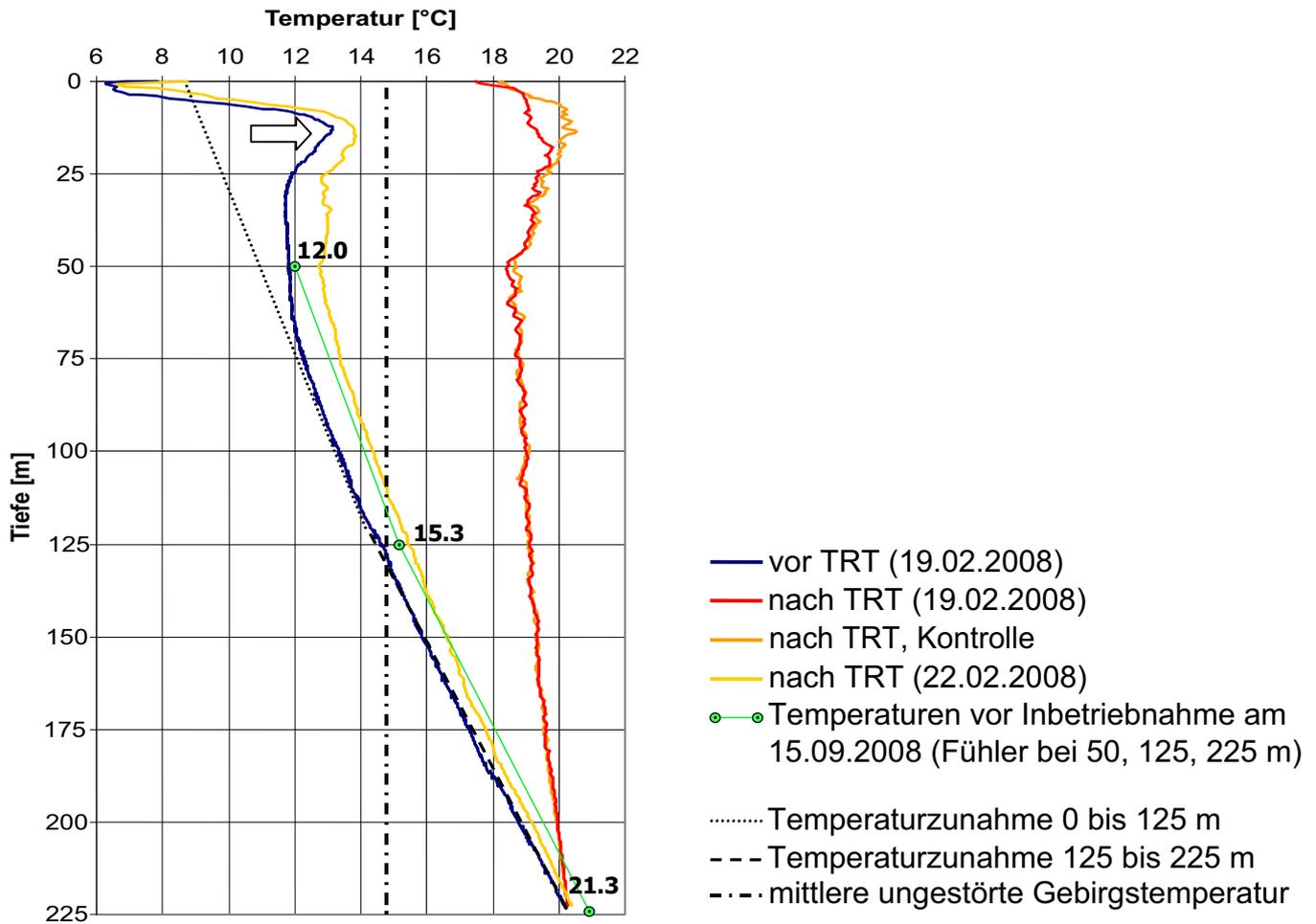
PROJEKT: Effizienz- und thermische Behaglichkeitsermittlung einer Heiz- und Kühlanlage in Aarau			Hammerspülbohrung			
AUFTRAGGEBER:	AIM Projektmanagement/Lämmli Architektur AG	STANDORT:	General Guisan-Strasse 2, 5000 Aarau			
BAULEITUNG:	EBERHARD & Partner AG, General Guisan-Str. 2 5000 Aarau; Tel: 062 823 27 07	OK BOHRLOCH:	ca. 411 m ü.M.			
UNTERNEHMER:	PBS Bohr AG, 6221 Rickenbach LU	KOORDINATEN:	646'255/247'800			
GEOL. AUFNAHME:	M.Müller	RICHTUNG:	-			
BOHRBEGINN:	14.09.2007	NEIGUNG:	vertikal			
BOHRENDE:	17.09.2007	GESAMTLÄNGE:	225 m			
		PROJEKT-NR.:	A879 / A934			
Lithologie	Verrohrung	Wasser-eintritt	m	Geotechnische Beschreibung des Bohrgutes	Geol. Interpretation/ Gesteinsinformation	Geologischer Zellausschnitt
			2			
			4		Schwemmlehm	
			6	Toniger Silt, hellbraun, mit vereinzelt Kieskomp. Ø 1-2 cm		
			8			
			10	Sauberer Kies, grau, Kieskomp. Ø 2-3 cm		
			12			
			14	Kies mit geringem Sandanteil, grau Kieskomp. Ø 1-2 cm		
			16		Hochterrassenschotter	Quartär
			18	Sauberer Kies, grau, Kieskomp. Ø 2-3 cm		
			20			
			22			
			24	Kies mit hohem Sandanteil, graubraun Kieskomp. Ø 2-4 cm		
			26			
			28			
			30	Siltiger Kies, hellbraun, Kieskomp. Ø 0.5-2 cm		
			32			
			34	Kies m. geringem Sandanteil, grau, Kieskomp. Ø 1-2 cm		
			36	Toniger Silt, braun mit grünlichen Schlieren	verwitterte Wangener Schichten	
			38	Toniger Silt, hellbraun mit Kalkbruchstücken		
			40			
			42		Wangener Schichten	
			44	Kalkstein, beige-grau		
			46			
			48	Kalkstein, hellgrau, mit Glaukonit	Crenularis Schichten	
			50			
			52			
			54			
			56			
			58	Kalkstein, beige-gelblich	Geissberg Schichten	
			60			
			62			
			64			
			66			
			68			
			70	Mergelkalkstein, bräunlich grau	verwitterte Effinger Schichten	
			72			
			74	Mergelstein, dunkelgrau		
			76			
			78	Mergelkalkstein, bräunlich grau		
			80			
			82			
			84			
			86	Mergelkalkstein, grau		
			88			
			90			
			92			
			94			
			96			
			98			
			100			
			102			
			104	Mergelstein, dunkelgrau		
			106			
			108			
			110			
			112			
			114			
			116			
			118	Mergelstein, hellgrau		
			120			
			122			
			124	Mergelstein, grau		
			126			
			128			
			130			
			132			
			134	Mergelkalkstein, dunkelgrau		
			136			
			138		Effinger Schichten	Malm
			140	mergeliger Tonstein, dunkelgrau		
			142			
			144			
			146	Mergelstein, dunkelgrau		
			148			
			150			
			152			
			154			
			156	Mergelkalkstein, dunkelgrau		
			158			
			160			
			162			
			164	mergeliger Tonstein, dunkelgrau		
			166			
			170			
			172	Mergelstein mit Markasit, dunkelgrau		
			174			
			176			
			178	Mergelkalkstein, dunkelgrau		
			180			
			182			
			184			
			186			
			188			
			190	Mergelstein, dunkelgrau		
			192			
			194			
			196			
			198			
			200			
			202			
			204			
			206	Mergelkalkstein, dunkelgrau		
			208			
			210			
			212			
			214			
			216			
			218			
			220	Mergelstein, dunkelgrau		
			222			
			224			

geringer Wasser-zutritt

Wasser-zutritt nimmt gering zu

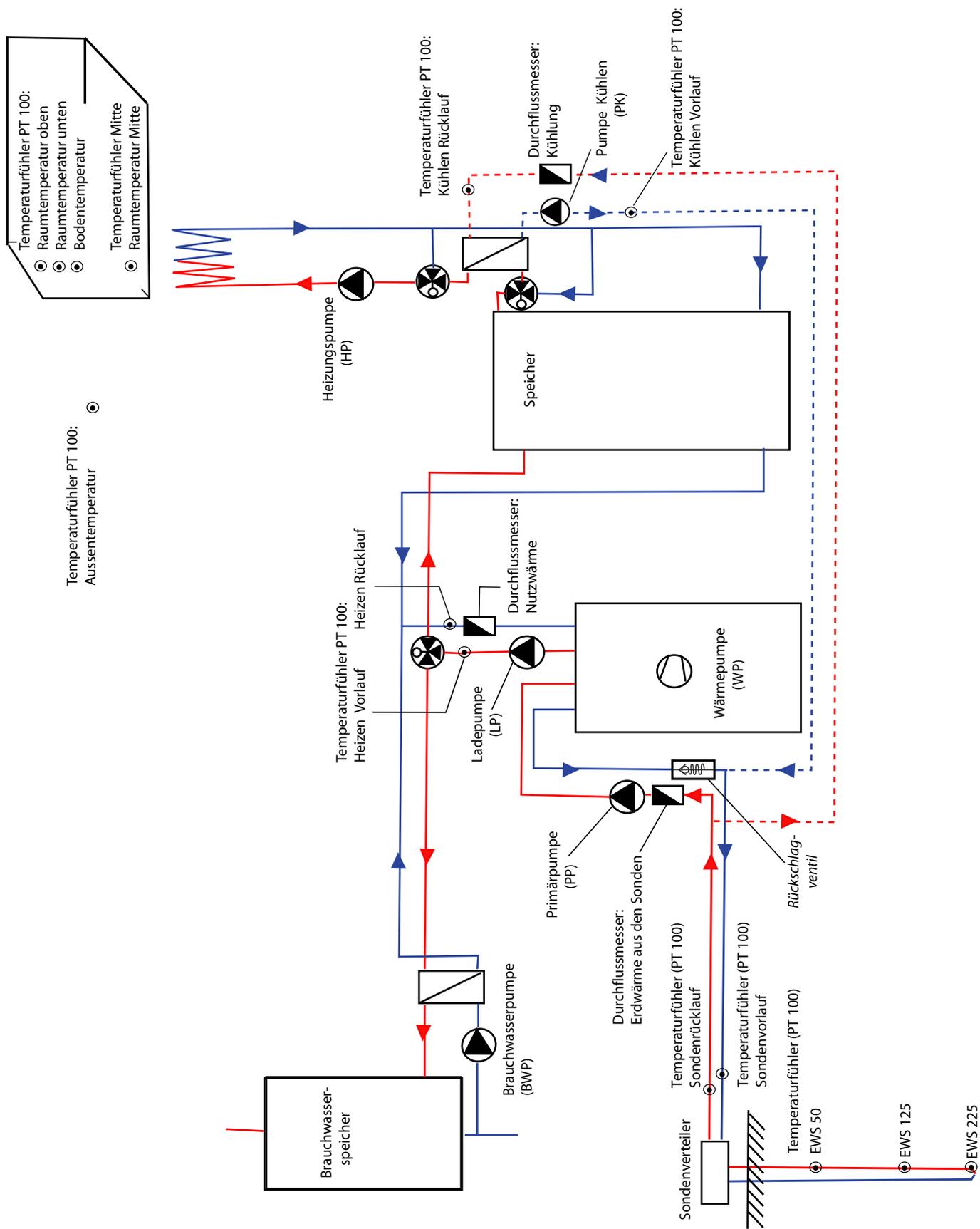
Thermal Response Test (TRT) der Erdwärmesonden und anfängliches Temperaturprofil

Anfängliche mittlere Bodentemperatur	14.4 °C
Geothermischer Tiefengradient ab 125 m	0.06 K/m
Thermischer Bohrlochwiderstand	0.071 K/Wm
Mittlere thermische Leitfähigkeit der Gesteine	2.14 W/mK

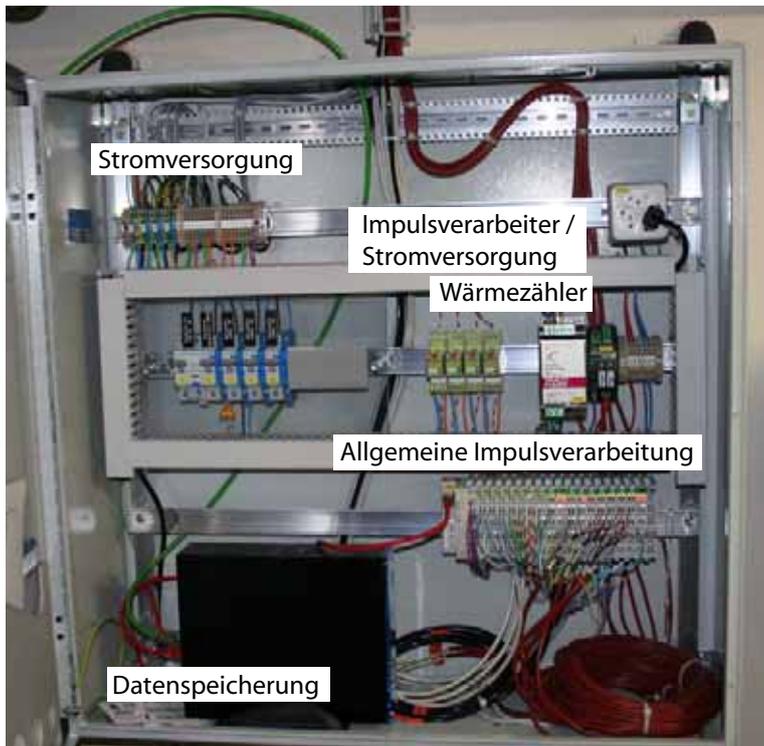
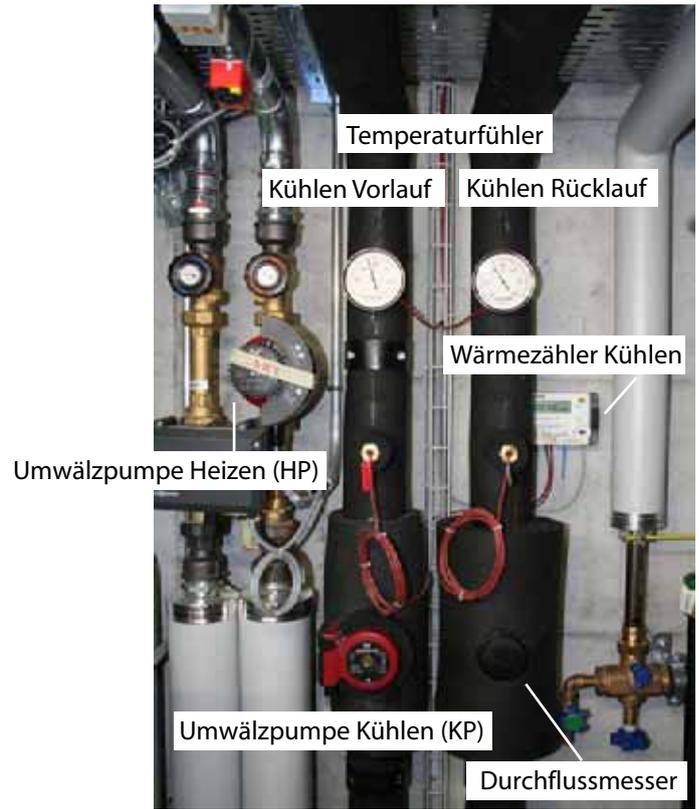
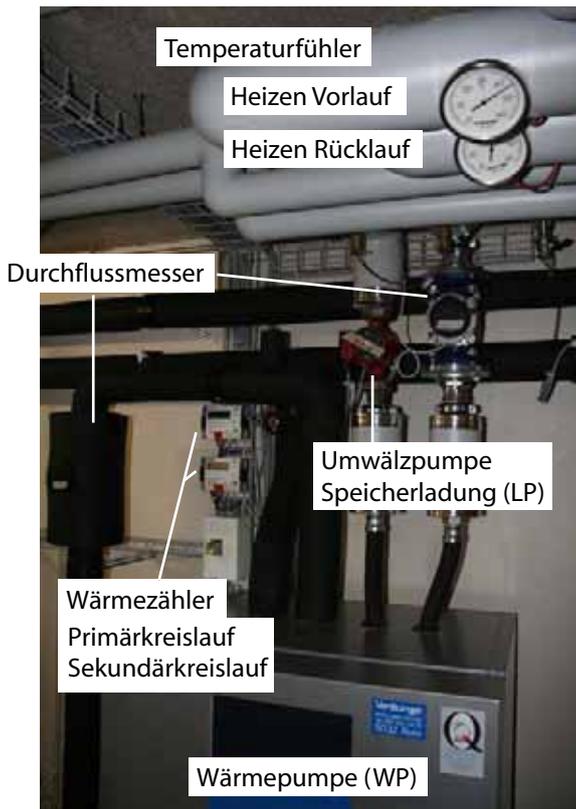


Tiefe	225 m
Bohrdurchmesser	152 mm
Sondentyp	Doppel-U
Rohr	Polyethylen
Rohrdurchmesser	40 mm
Rohr-Wandstärke	4 mm
Auffüllmaterial	Bentonit
Transportflüssigkeit beim Test	Wasser und 20 % Ethylenglykol
Durchfluss während des Tests	1'909 l/h = 31.8 l/min
Mittlere Wärmeleistung während des Tests	5'510 W / 225 m = 24.5 W/m

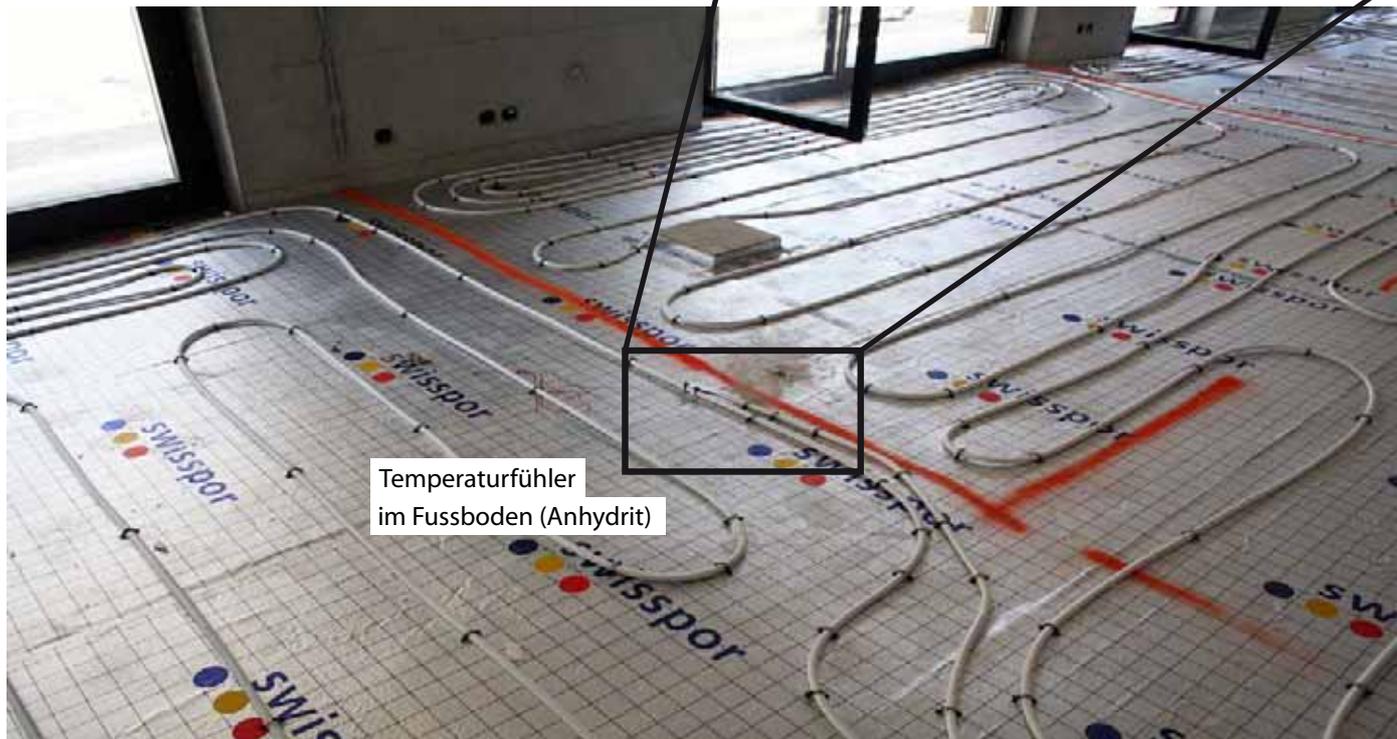
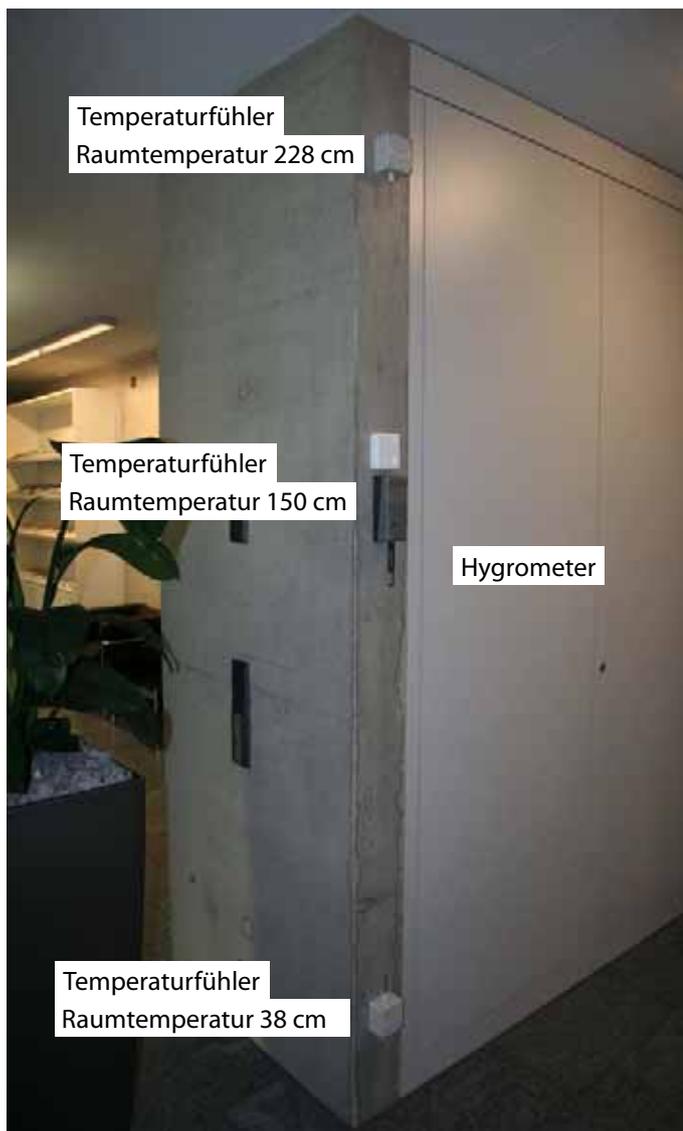
# Prinzipschema der Wärmepumpenanlage und Messapparaturen



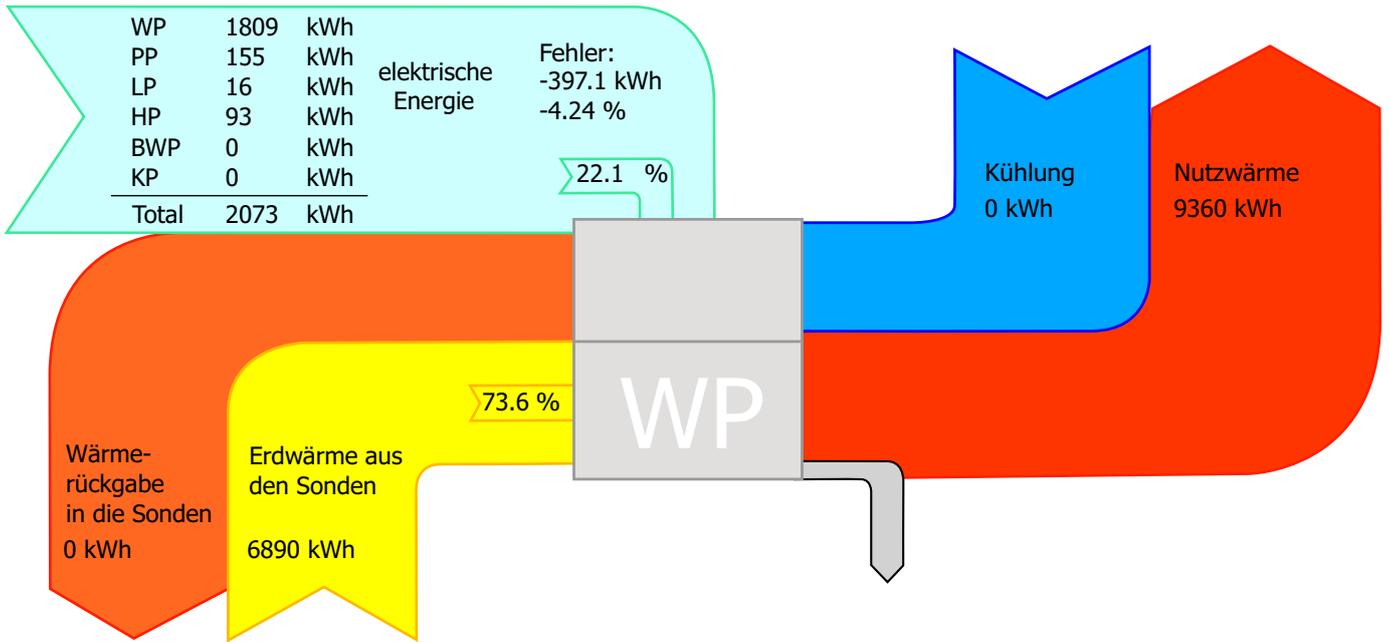
Fotodokumentation der Messapparaturen Heizanlage



Fotodokumentation der Messapparaturen Innenraum



Temperatur und Wärmebilanz im Dezember 2008

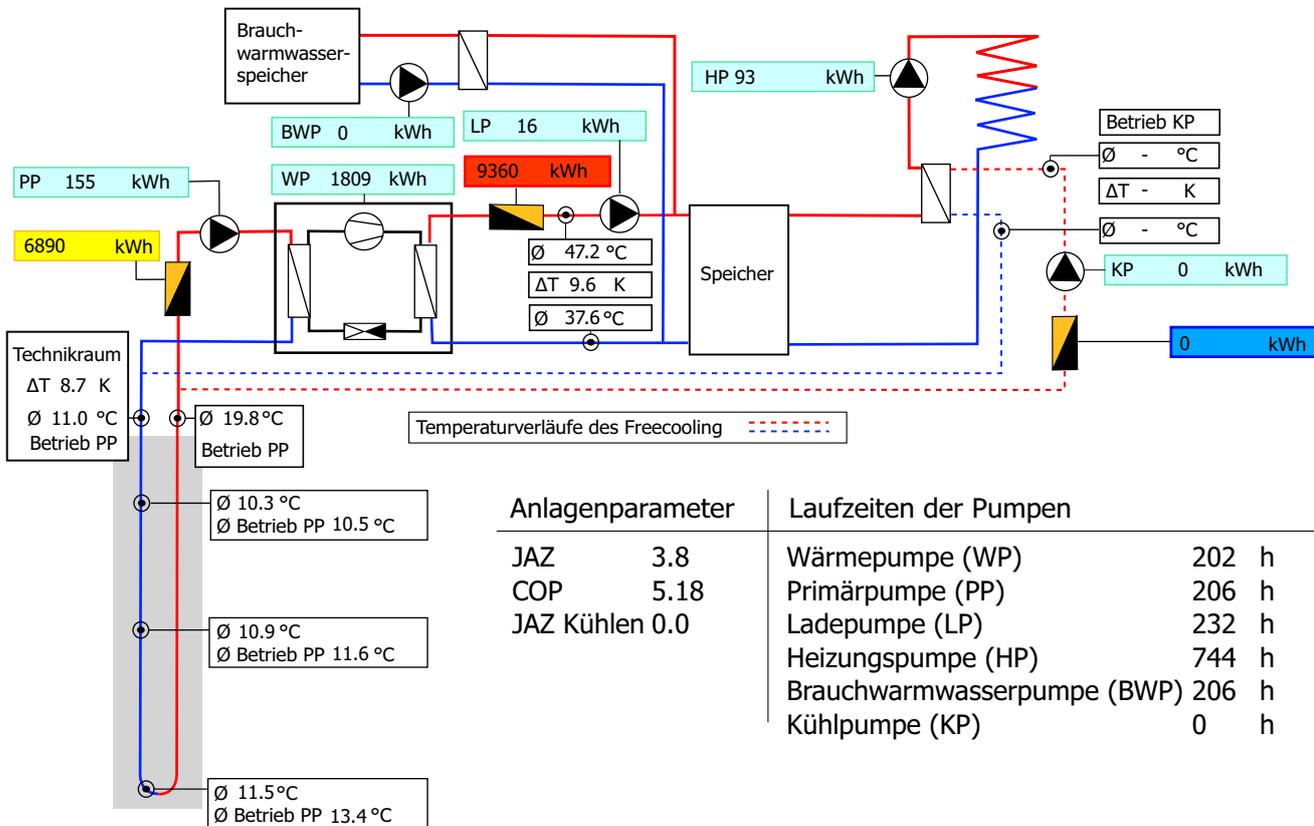


Ausstemperatur

Ø	1.4 °C
MIN	-5.1 °C
MAX	6.4 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	22.0 °C	Ø 46.1%
Ø	22.4 °C	
Ø	21.8 °C	
Ø	21.5 °C	



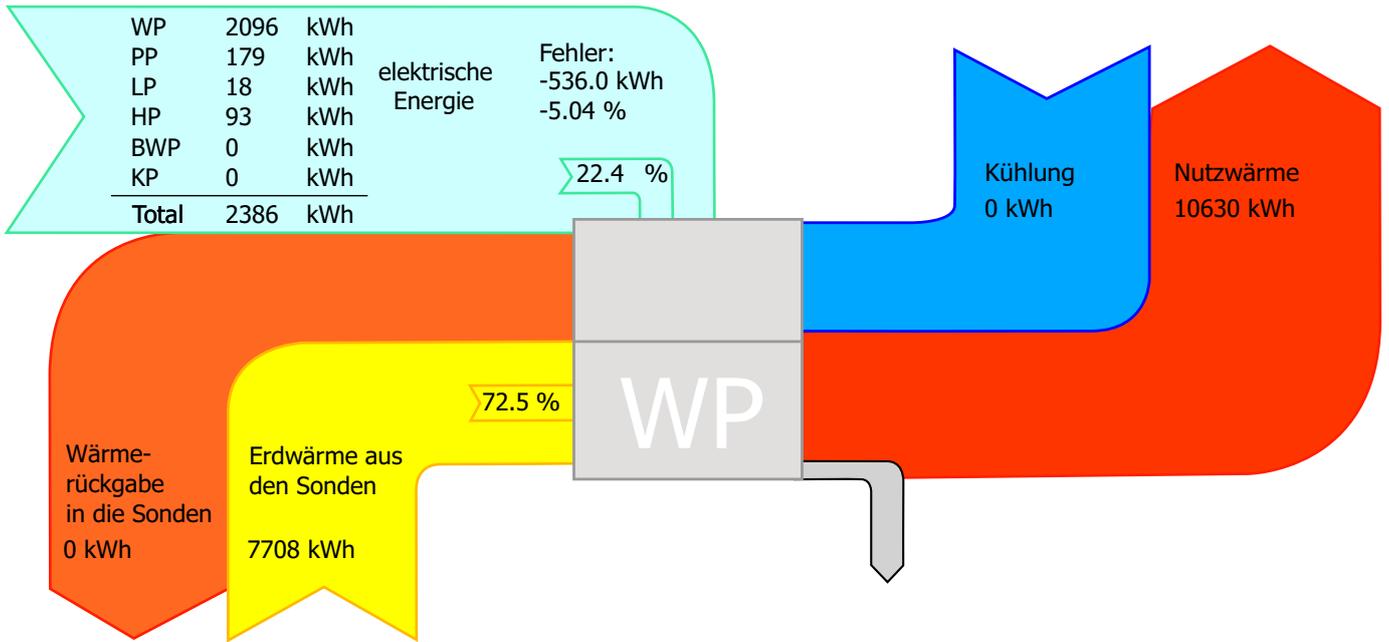
Anlagenparameter

JAZ	3.8
COP	5.18
JAZ Kühlen	0.0

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	202 h
Primärpumpe (PP)	206 h
Ladepumpe (LP)	232 h
Heizungspumpe (HP)	744 h
Brauchwarmwasserpumpe (BWP)	206 h
Kühlpumpe (KP)	0 h

Temperatur und Wärmebilanz im Januar 2009

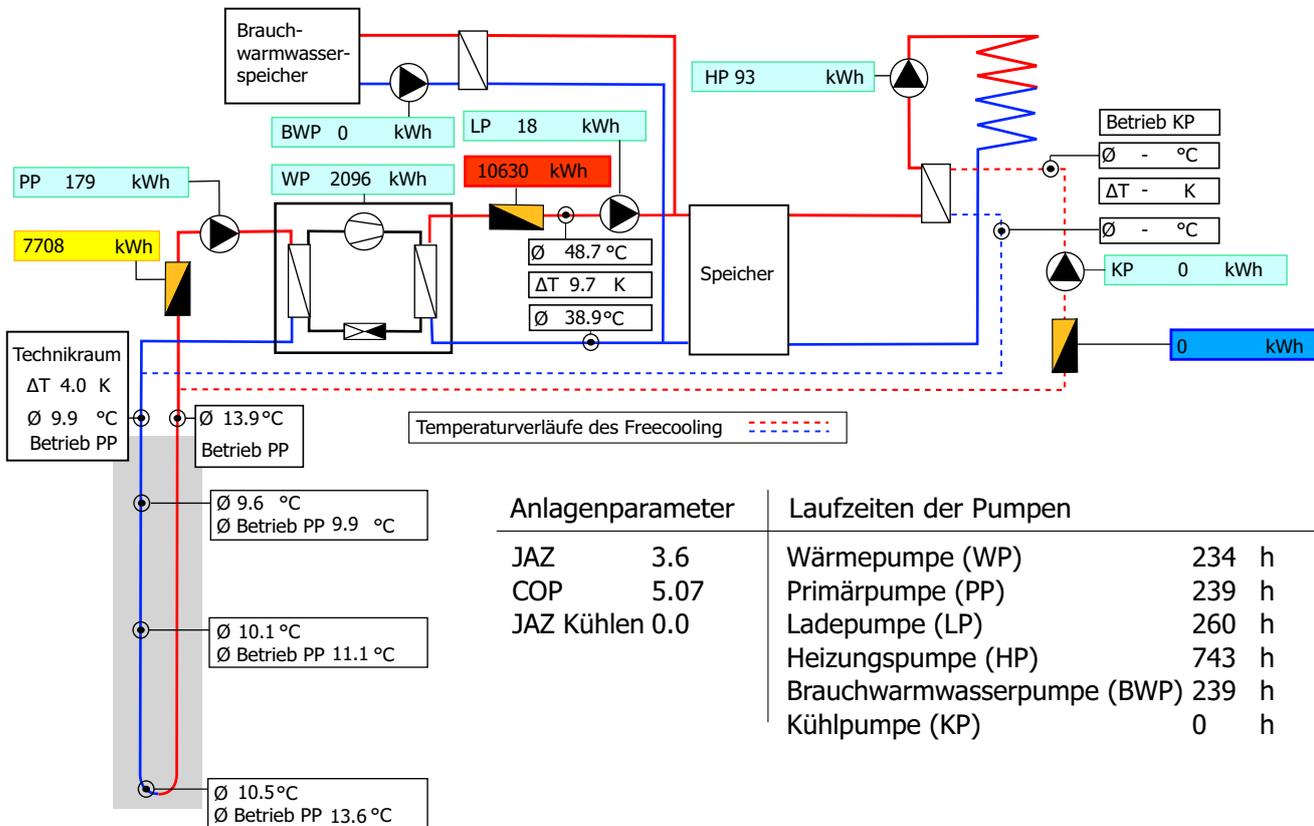


Ausstemperatur

Ø	-0.9 °C
MIN	-6.9 °C
MAX	5.8 °C

Raumparameter

Temperaturen	Luftfeuchtigkeit
Ø 22.0 °C	Ø 42.8%
Ø 22.3 °C	
Ø 21.4 °C	
Ø 21.0 °C	



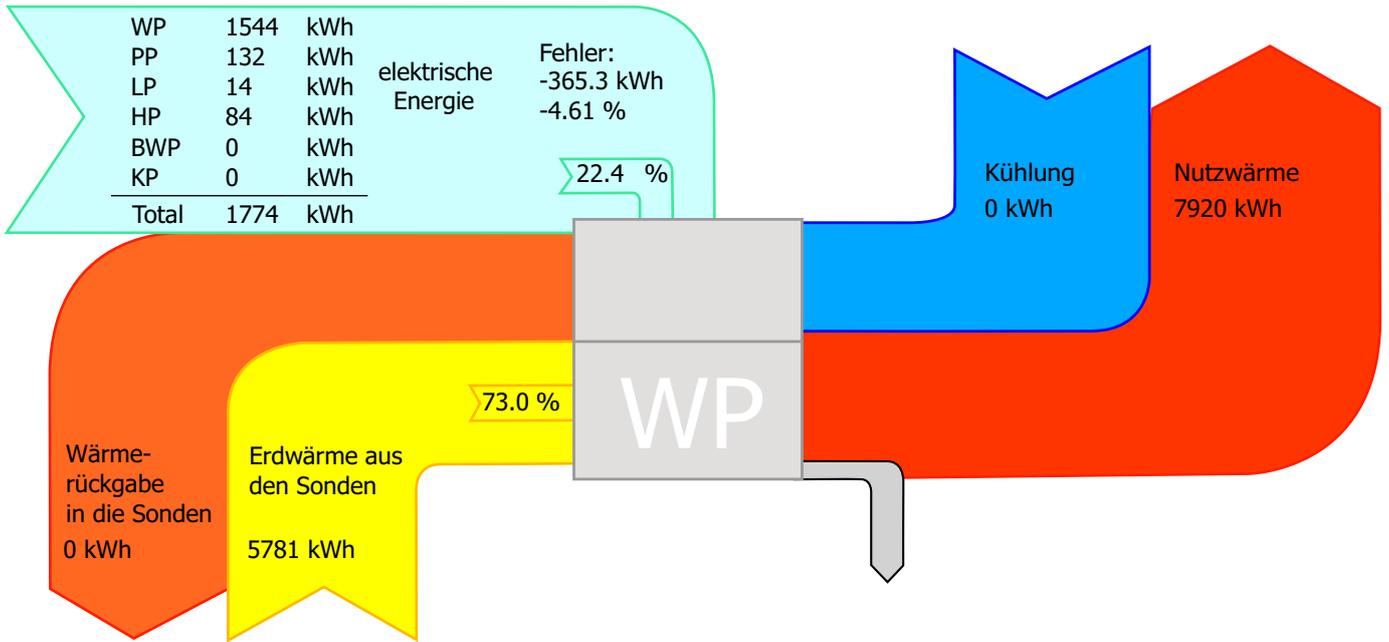
Anlagenparameter

JAZ	3.6
COP	5.07
JAZ Kühlen	0.0

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	234 h
Primärpumpe (PP)	239 h
Ladepumpe (LP)	260 h
Heizungspumpe (HP)	743 h
Brauchwärmwasserpumpe (BWP)	239 h
Kühlpumpe (KP)	0 h

Temperatur und Wärmebilanz im Februar 2009

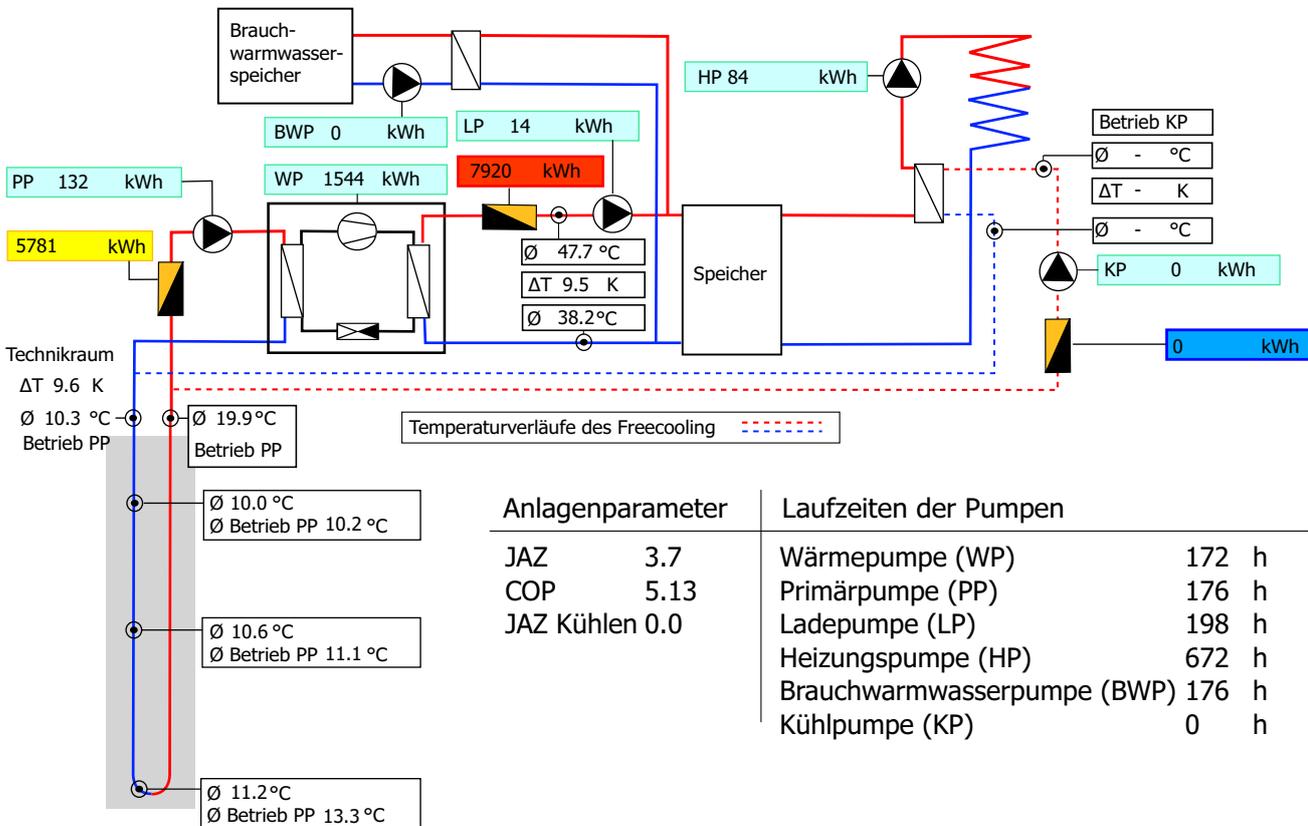


Ausstemperatur

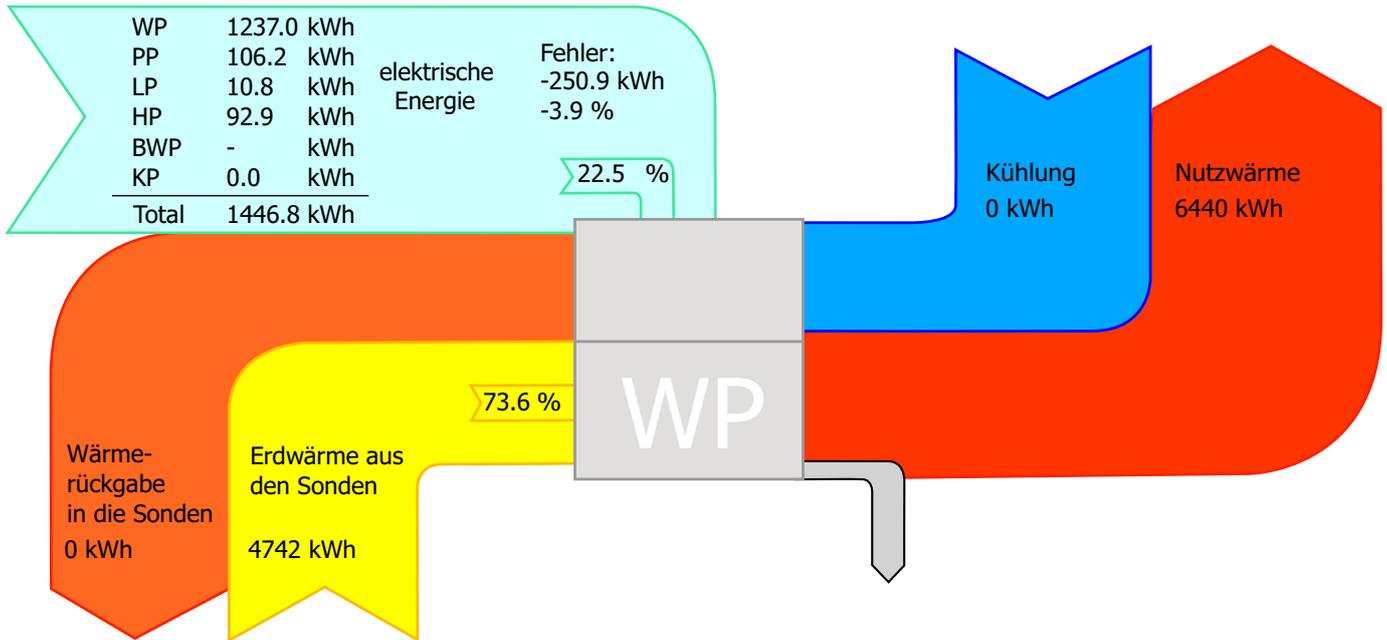
Ø	1.2 °C
MIN	-6.9 °C
MAX	8.3 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	22.6 °C	Ø 40.9%
Ø	22.8 °C	
Ø	21.9 °C	
Ø	21.7 °C	



# Temperatur und Wärmebilanz im März 2009

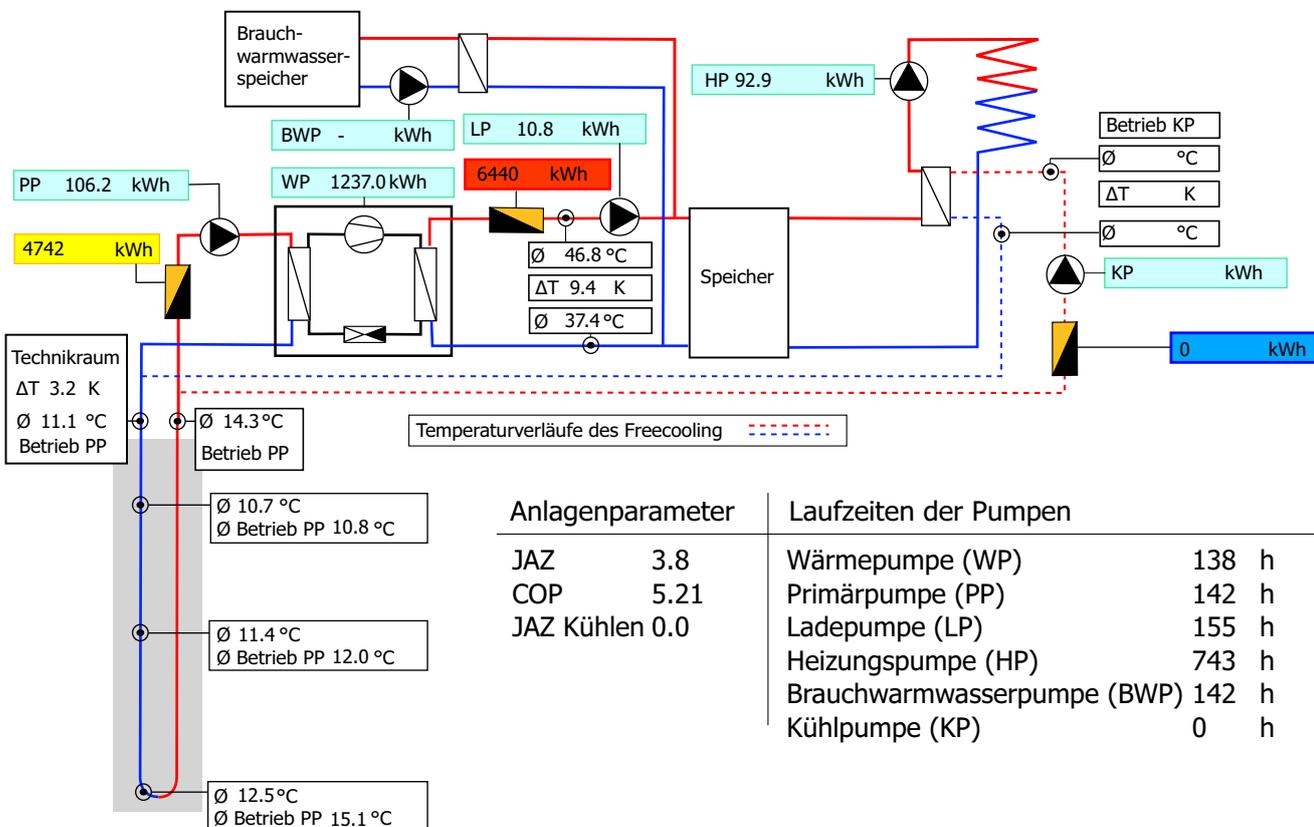


## Ausstemperatur

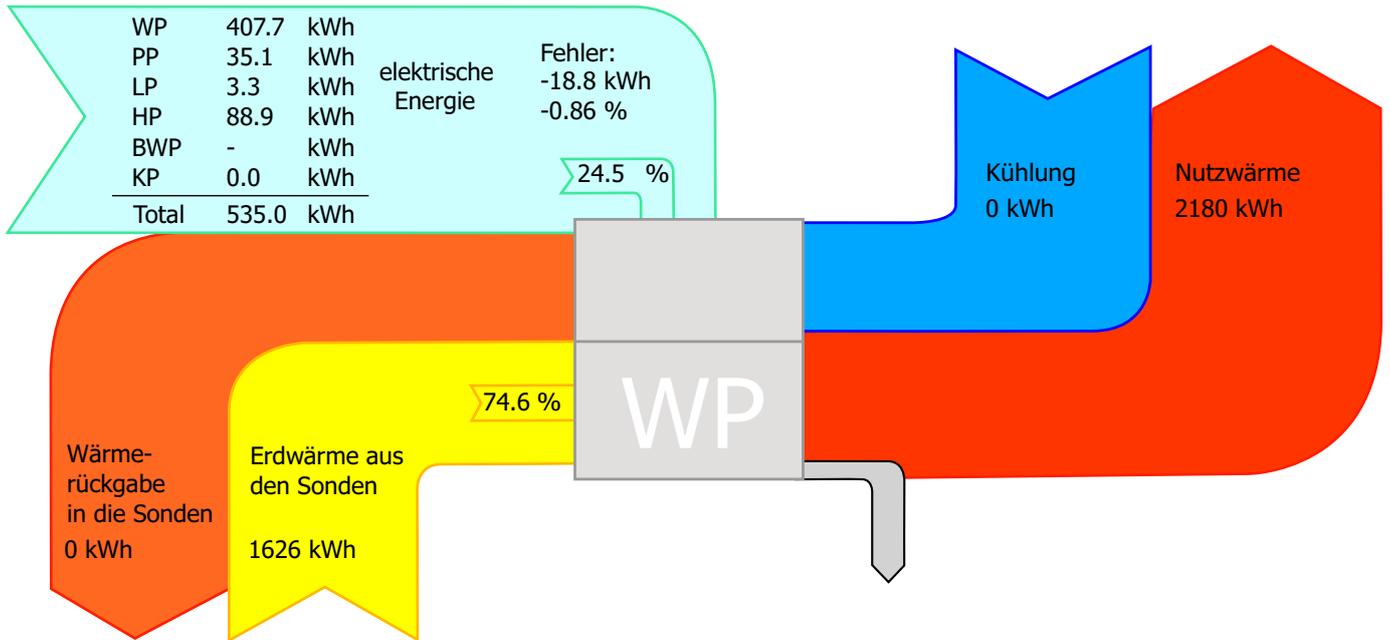
Ø	5.4 °C
MIN	-0.6 °C
MAX	12.5 °C

## Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	23.0 °C	Ø 42.2%
Ø	23.2 °C	
Ø	22.4 °C	
Ø	22.1 °C	



Temperatur und Wärmebilanz im April 2009

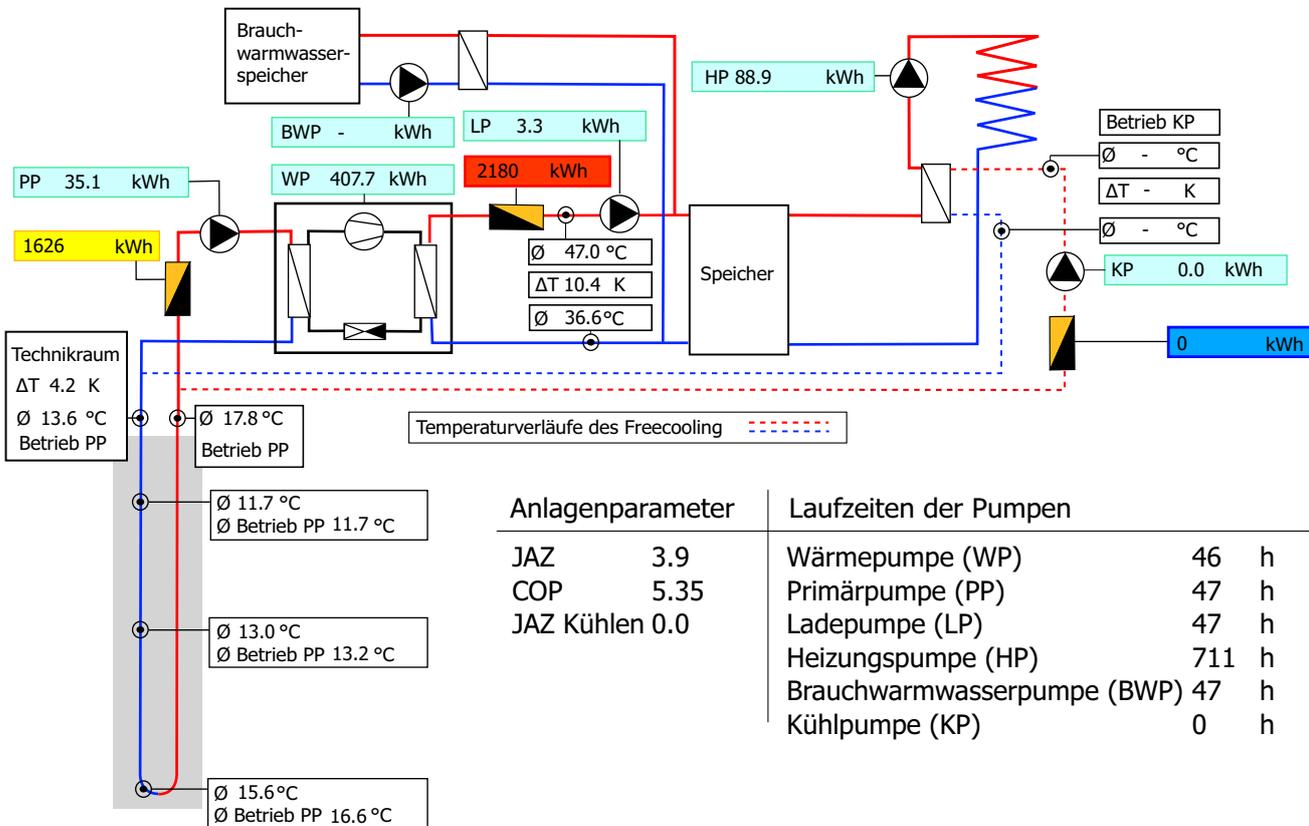


Ausstemperatur

Ø	12.6 °C
MIN	5.7 °C
MAX	19.9 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	23.1 °C	Ø 45.8%
Ø	23.4 °C	
Ø	22.7 °C	
Ø	22.5 °C	



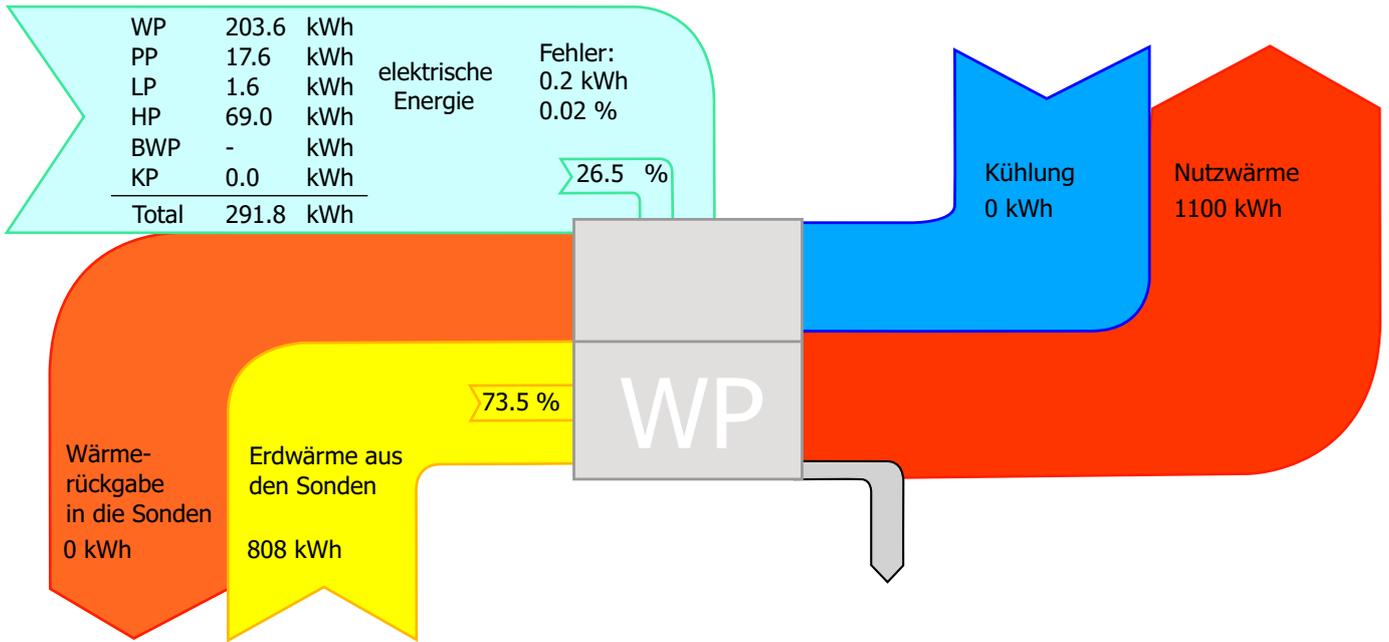
Anlagenparameter

JAZ	3.9
COP	5.35
JAZ Kühlen	0.0

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	46 h
Primärpumpe (PP)	47 h
Ladepumpe (LP)	47 h
Heizungspumpe (HP)	711 h
Brauchwärmwasserpumpe (BWP)	47 h
Kühlpumpe (KP)	0 h

Temperatur und Wärmebilanz im Mai 2009

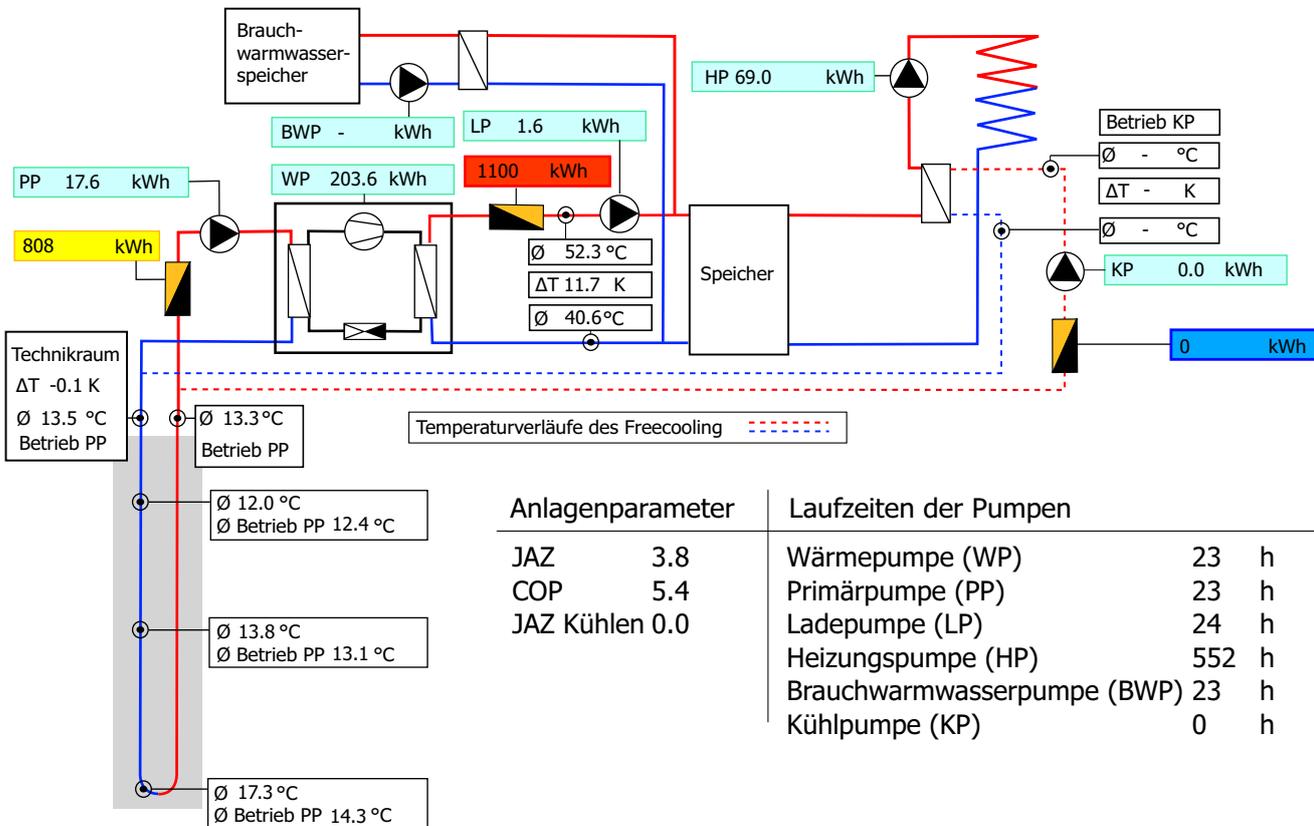


Ausstemperatur

Ø	16.7 °C
MIN	6.4 °C
MAX	28.9 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	24.0 °C	Ø 49.1%
Ø	24.3 °C	
Ø	23.6 °C	
Ø	23.2 °C	



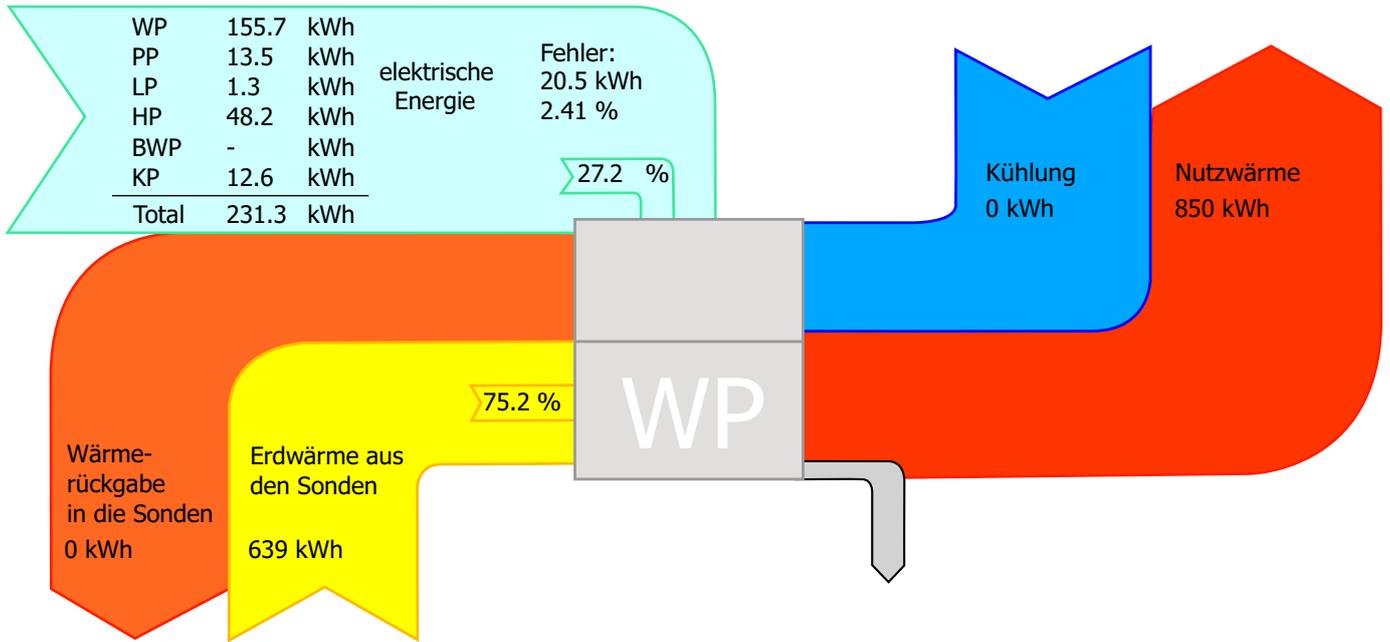
Anlagenparameter

JAZ	3.8
COP	5.4
JAZ Kühlen	0.0

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	23 h
Primärpumpe (PP)	23 h
Ladepumpe (LP)	24 h
Heizungspumpe (HP)	552 h
Brauchwarmwasserpumpe (BWP)	23 h
Kühlpumpe (KP)	0 h

# Temperatur und Wärmebilanz im Juni 2009

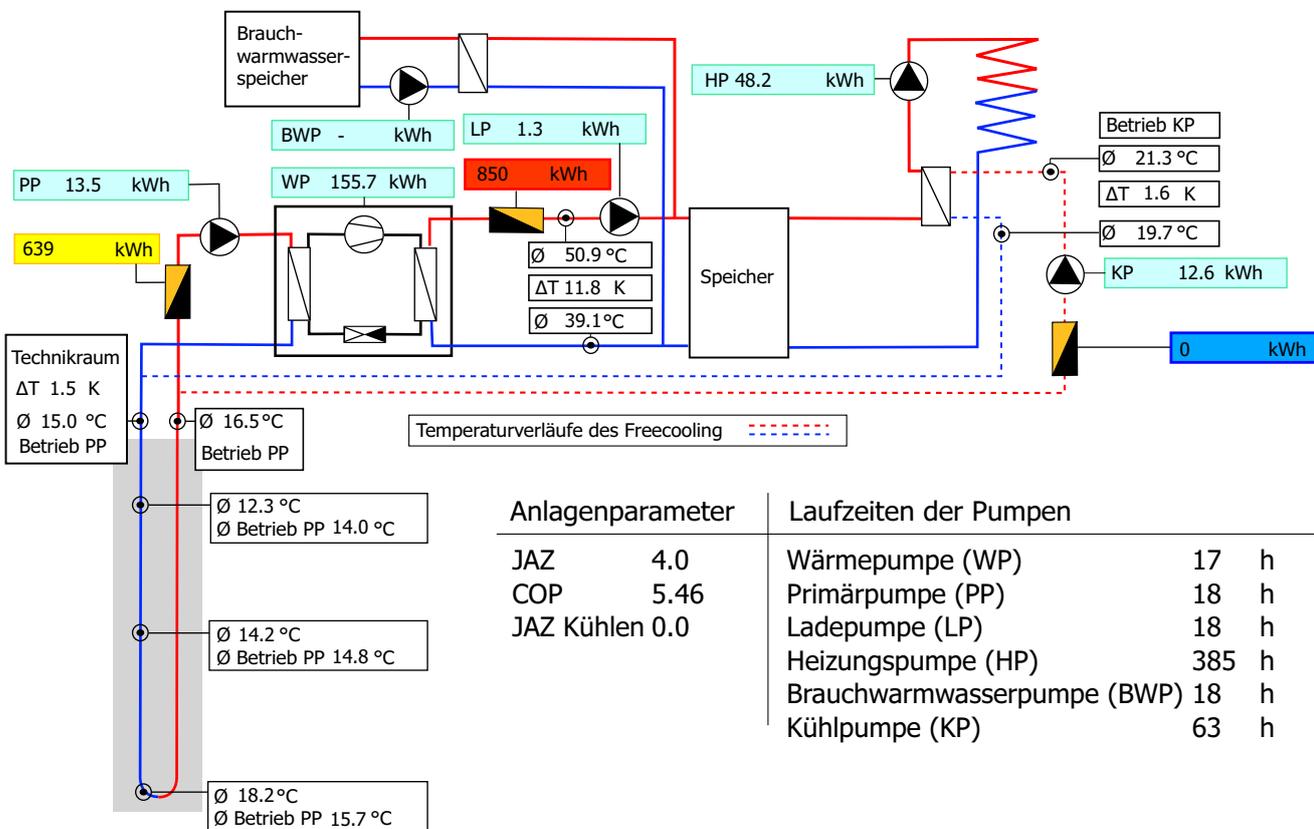


## Ausstemperatur

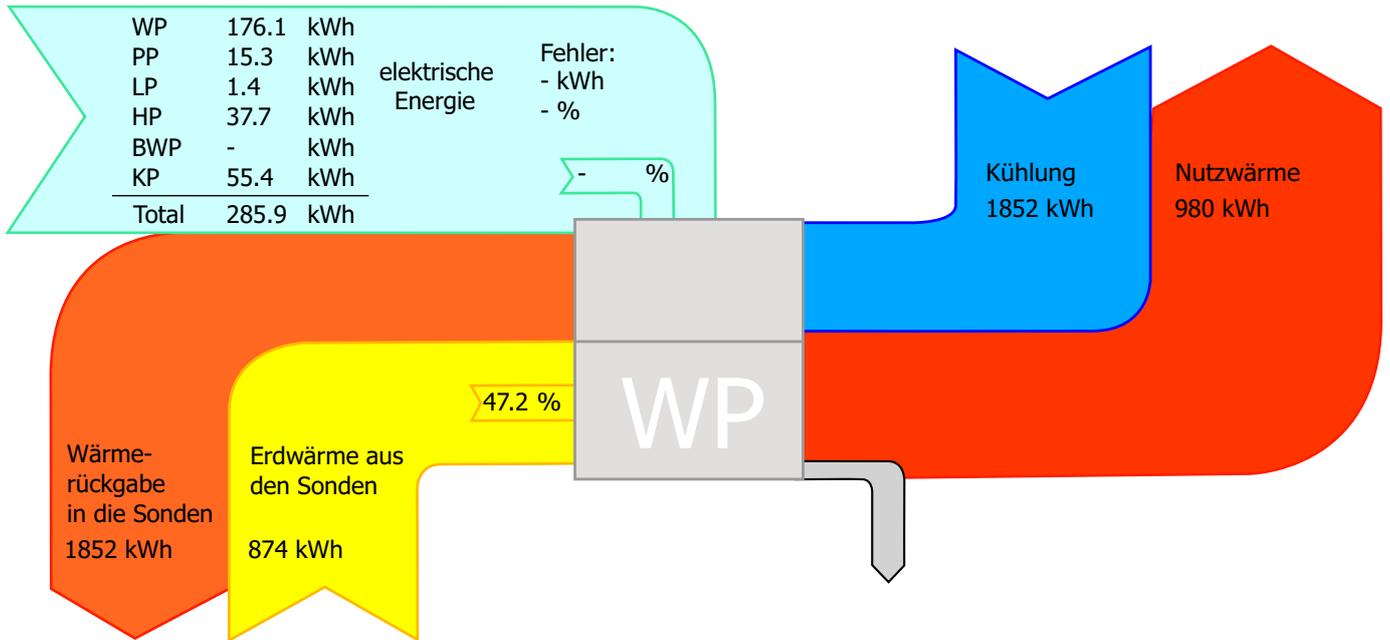
Ø	18.5 °C
MIN	12.3 °C
MAX	27.1 °C

## Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	25.0 °C	Ø 48.9%
Ø	25.3 °C	
Ø	24.5 °C	
Ø	23.9 °C	



# Temperatur und Wärmebilanz im Juli 2009

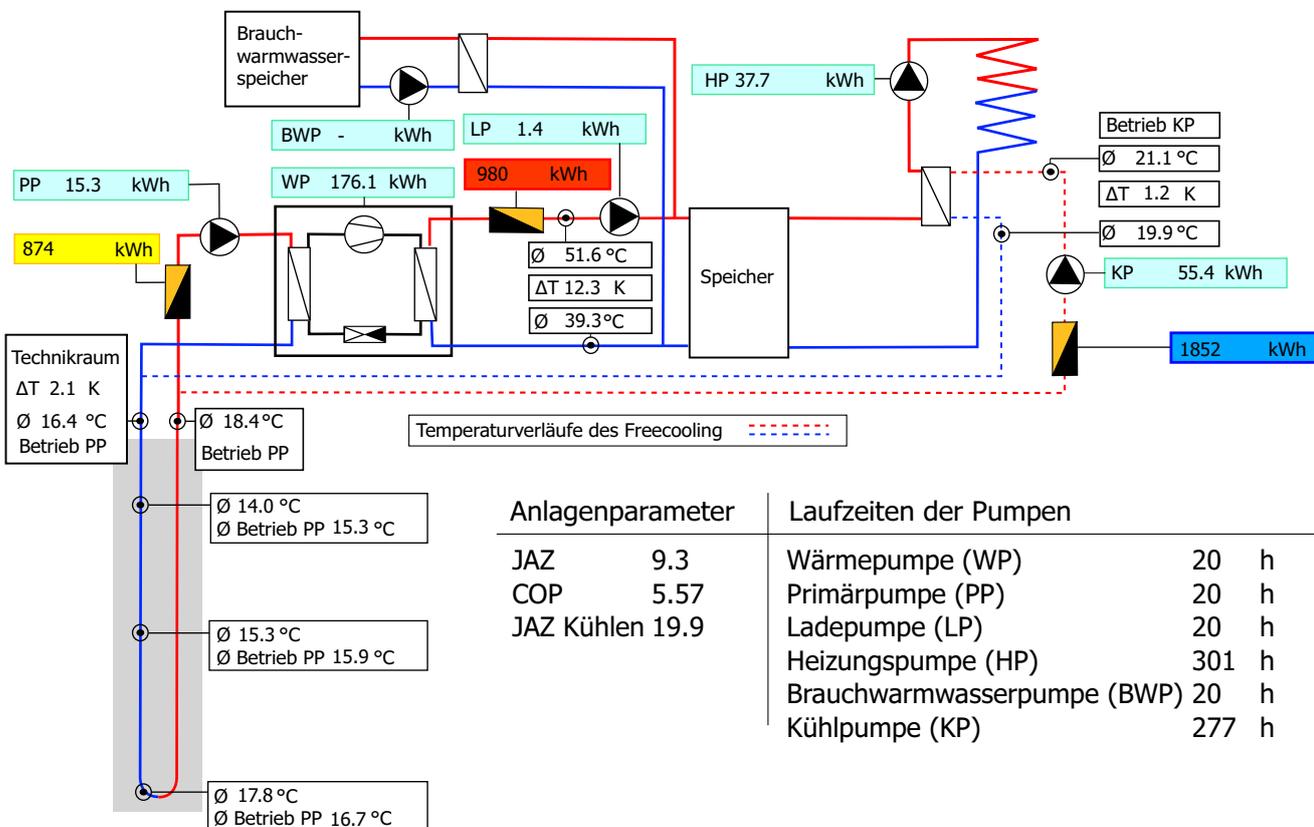


## Ausstemperatur

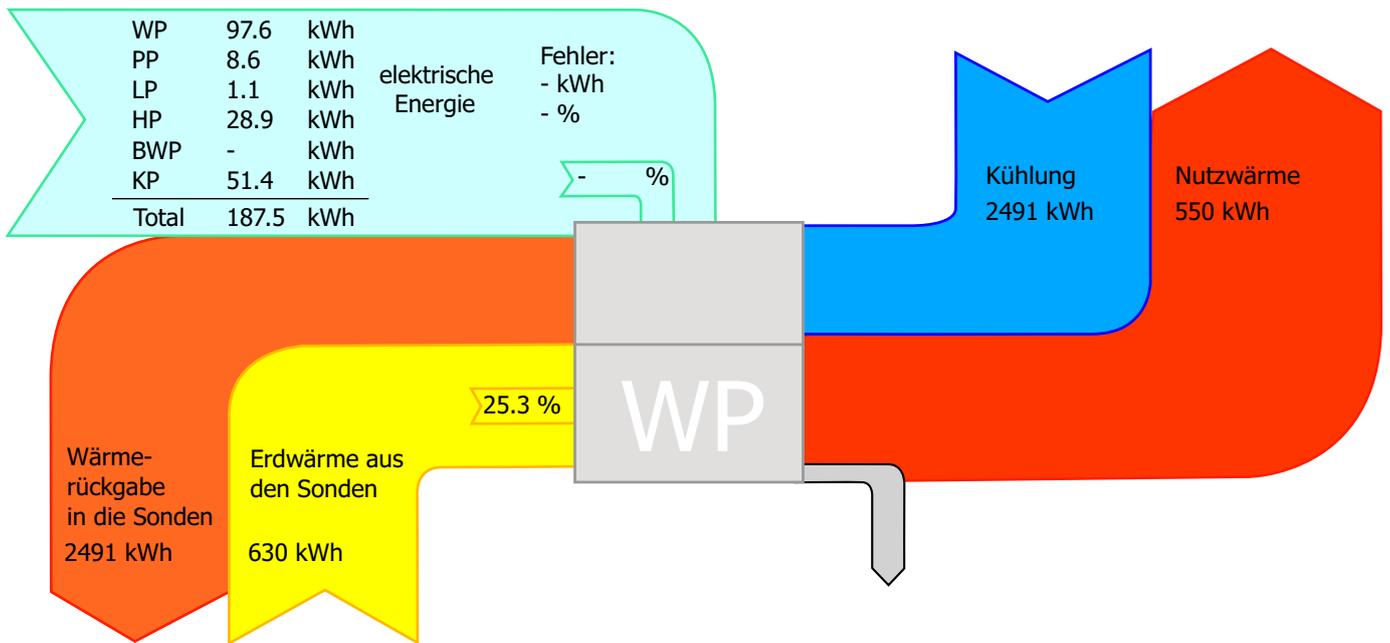
Ø	20.0 °C
MIN	13.6 °C
MAX	27.9 °C

## Raumparameter

Temperatur	Luftfeuchtigkeit
Ø 24.7 °C	Ø 61.6%
Ø 25.1 °C	
Ø 24.3 °C	
Ø 23.2 °C	



# Temperatur und Wärmebilanz im August 2009

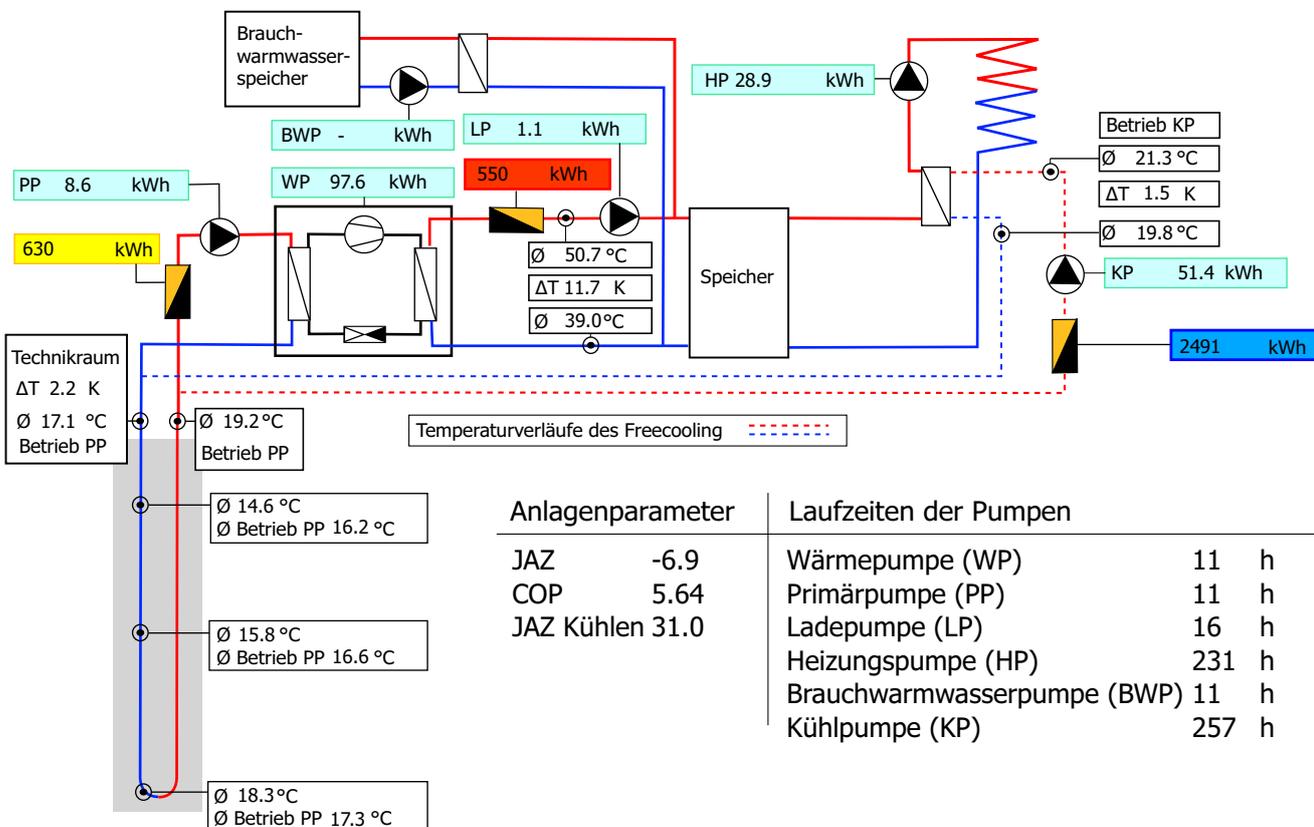


## Ausstemperatur

Ø	21.1 °C
MIN	12.3 °C
MAX	29.8 °C

## Raumparameter

Temperatur	Luftfeuchtigkeit
Ø 24.8 °C	Ø 61.6%
Ø 25.2 °C	
Ø 24.3 °C	
Ø 23.0 °C	



### Anlagenparameter

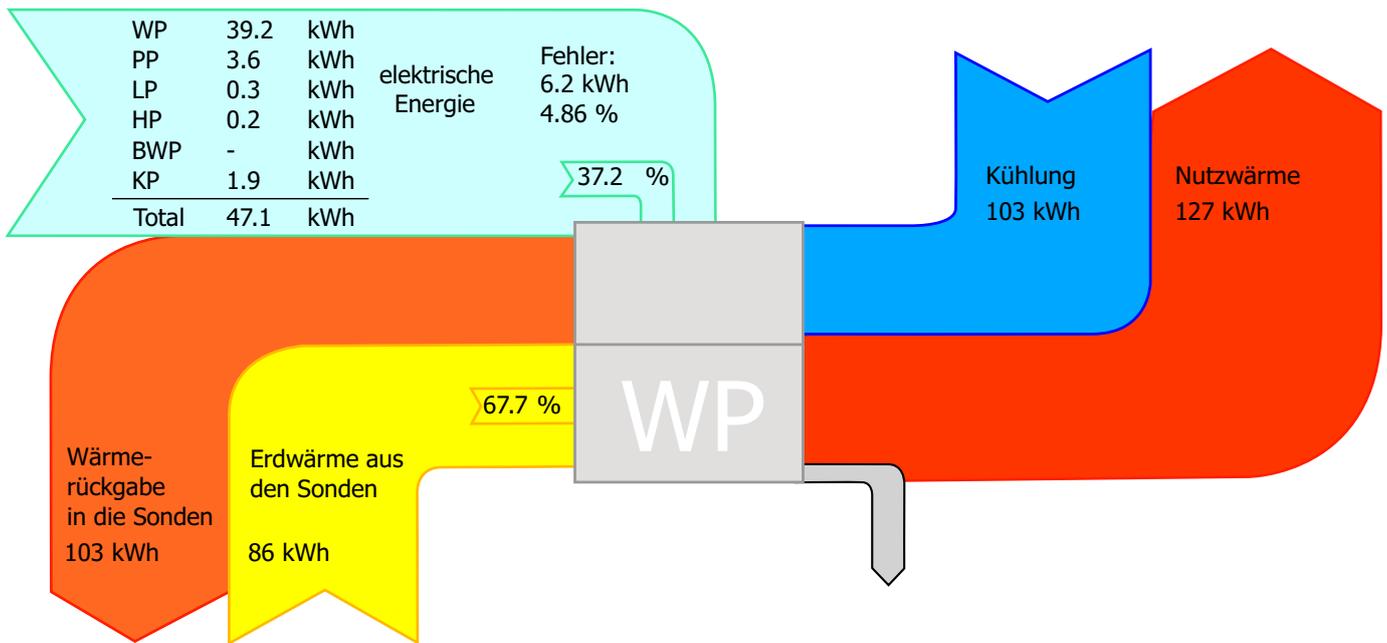
JAZ	-6.9
COP	5.64
JAZ Kühlen	31.0

### Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	11 h
Primärpumpe (PP)	11 h
Ladepumpe (LP)	16 h
Heizungspumpe (HP)	231 h
Brauchwarmwasserpumpe (BWP)	11 h
Kühlpumpe (KP)	257 h



# Temperatur und Wärmebilanz im September 2009

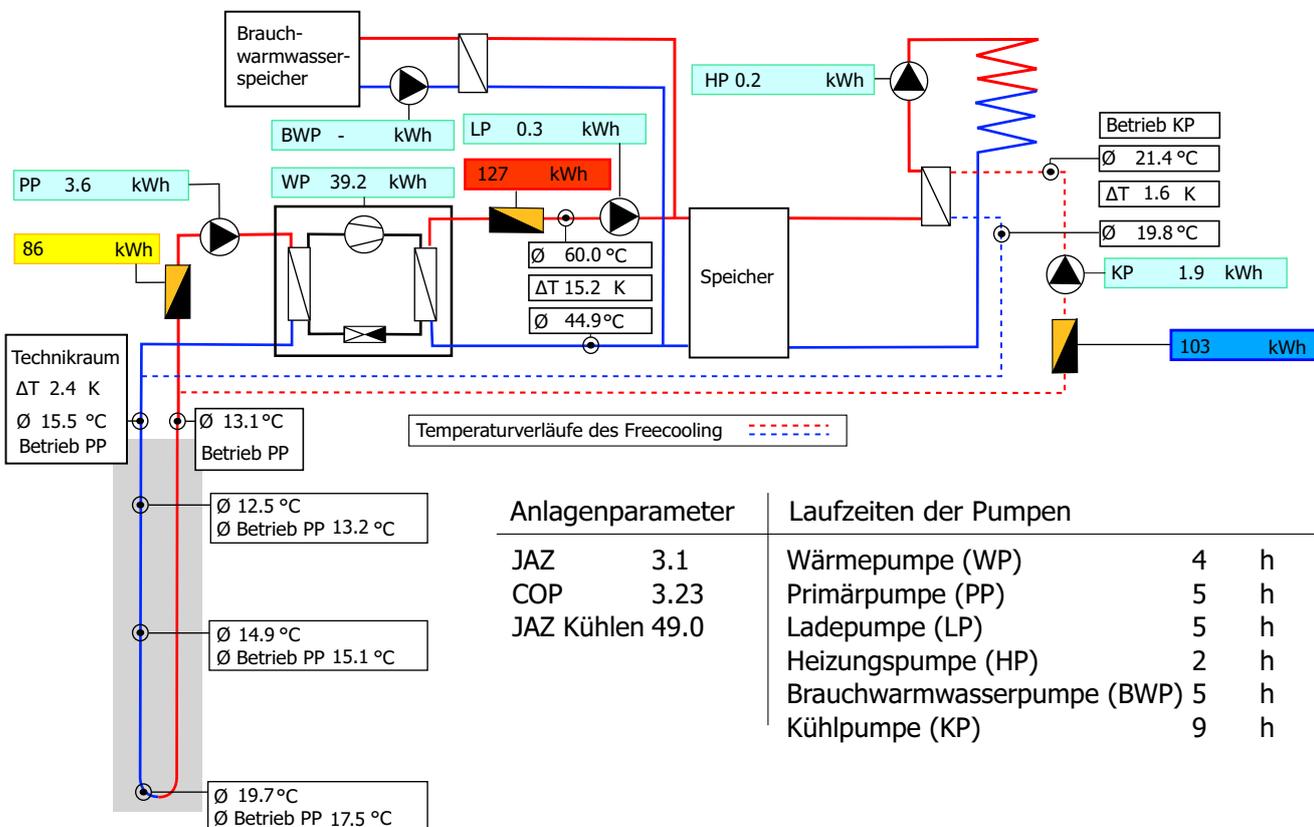


## Ausstemperatur

Ø	16.7 °C
MIN	10.3 °C
MAX	26.0 °C

## Raumparameter

Temperatur	Luftfeuchtigkeit
Ø 24.7 °C	Ø 53.0%
Ø 25.0 °C	
Ø 24.1 °C	
Ø 23.8 °C	



### Anlagenparameter

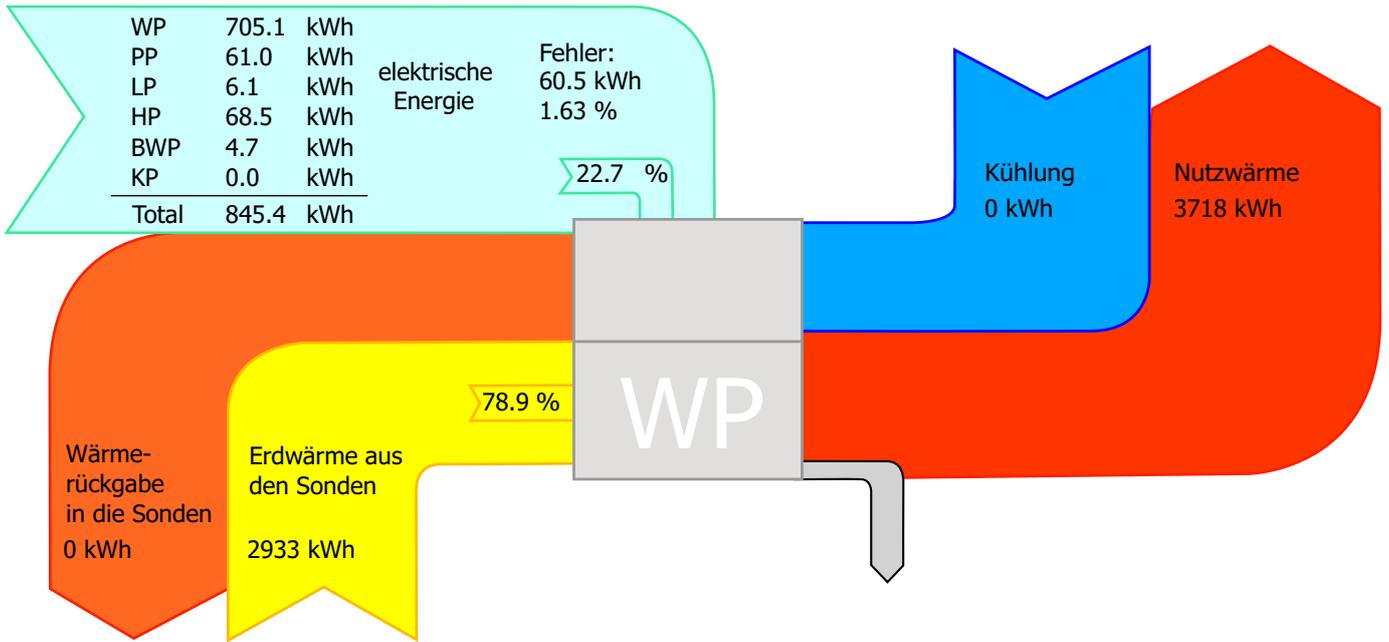
JAZ	3.1
COP	3.23
JAZ Kühlen	49.0

### Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	4	h
Primärpumpe (PP)	5	h
Ladepumpe (LP)	5	h
Heizungspumpe (HP)	2	h
Brauchwärmwasserpumpe (BWP)	5	h
Kühlpumpe (KP)	9	h



Temperatur und Wärmebilanz im Oktober 2009

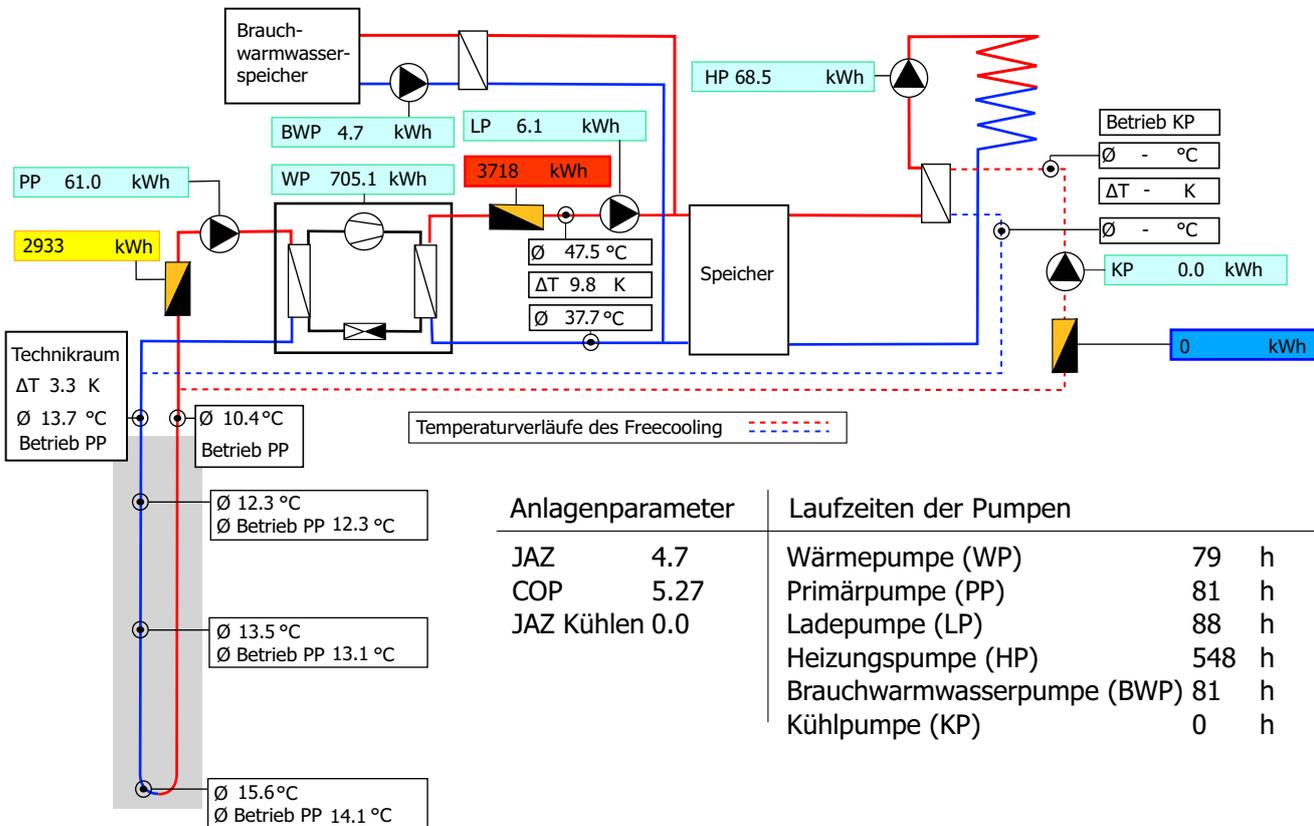


Ausstemperatur

Ø	10.4 °C
MIN	2.4 °C
MAX	21.9 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	24.2 °C	Ø 50.3%
Ø	24.5 °C	
Ø	23.6 °C	
Ø	23.6 °C	



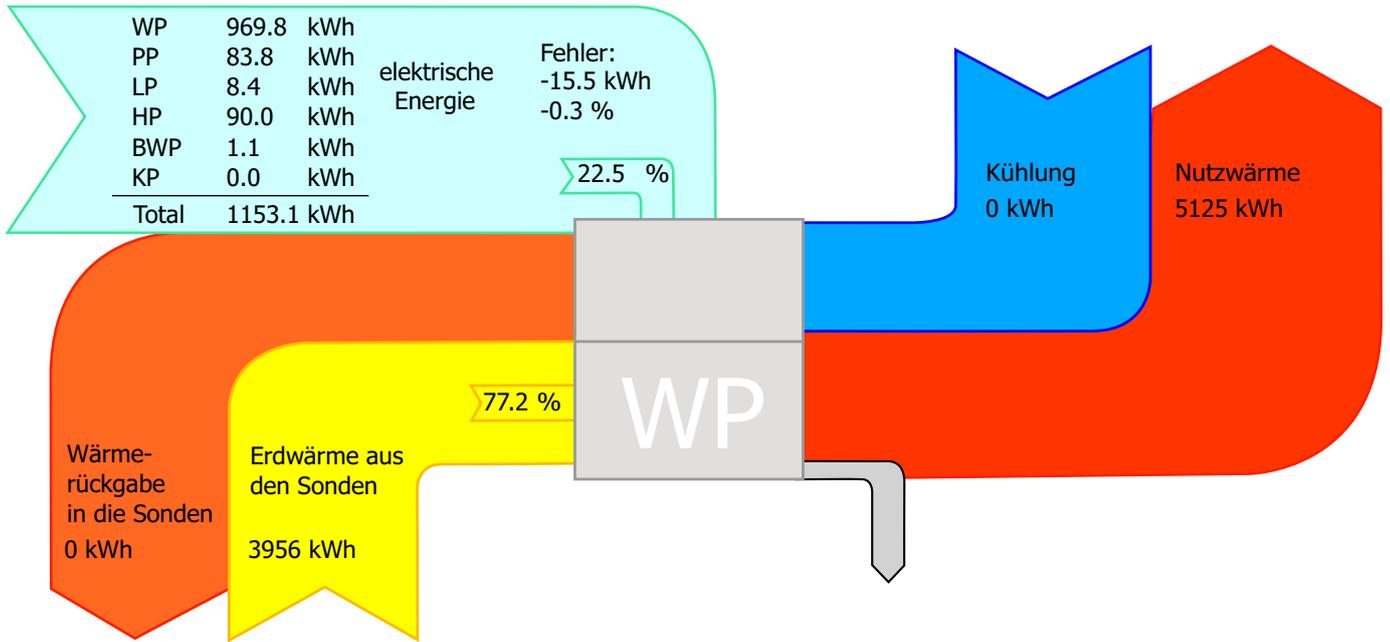
Anlagenparameter

JAZ	4.7
COP	5.27
JAZ Kühlen	0.0

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	79 h
Primärpumpe (PP)	81 h
Ladepumpe (LP)	88 h
Heizungspumpe (HP)	548 h
Brauchwärmwasserpumpe (BWP)	81 h
Kühlpumpe (KP)	0 h

Temperatur und Wärmebilanz im November 2009

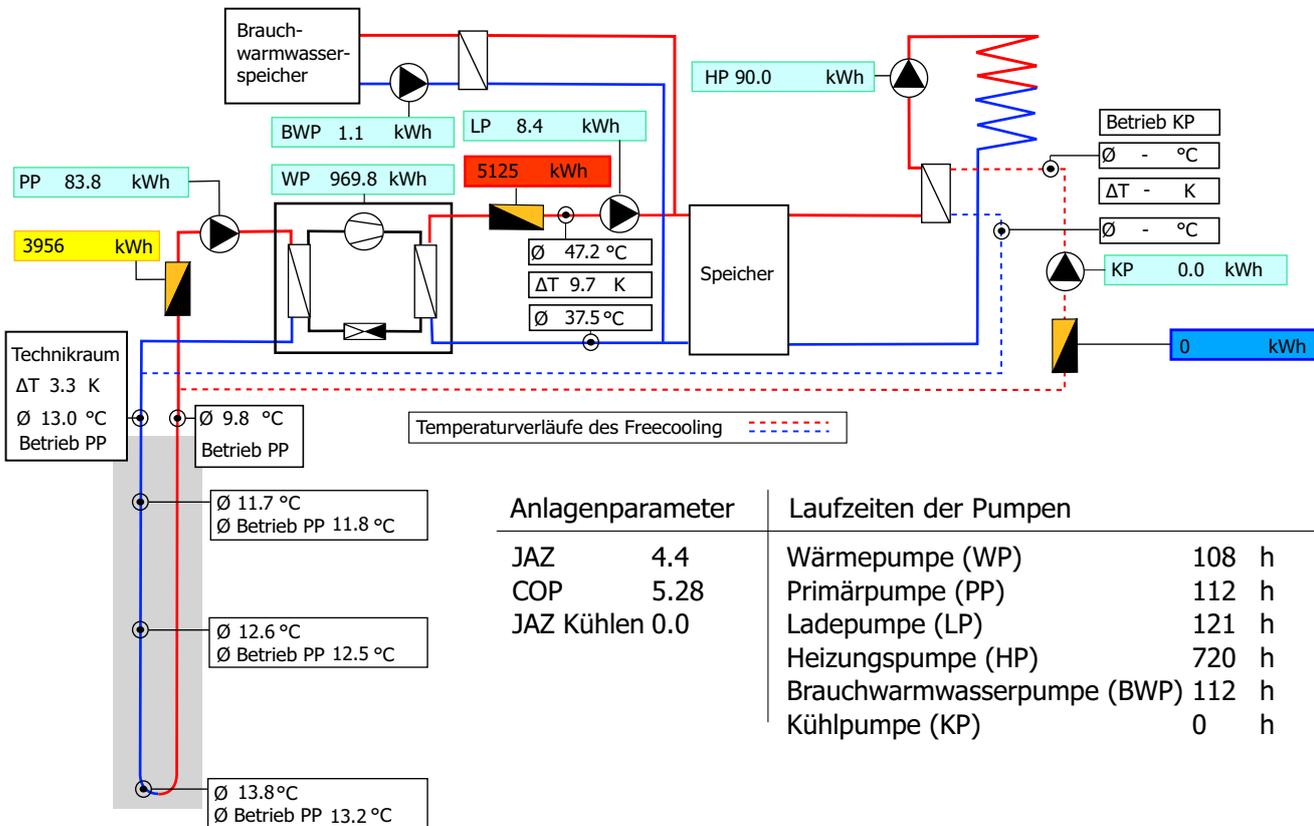


Ausstemperatur

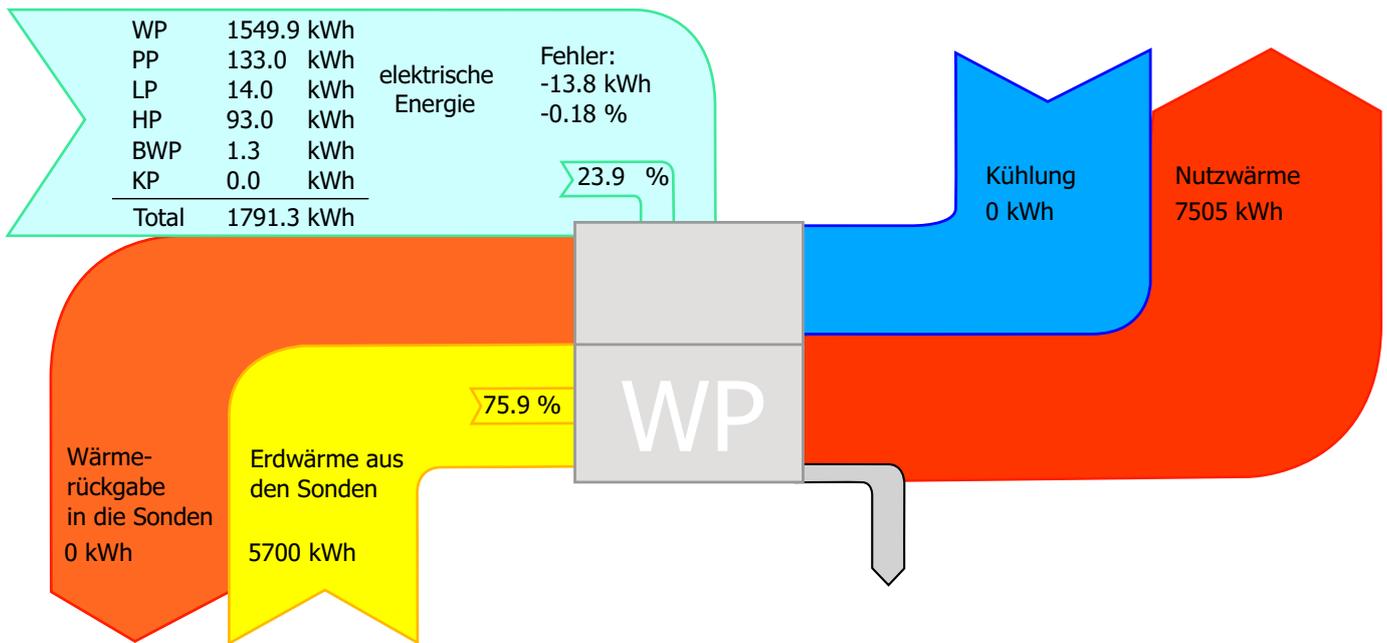
Ø	7.5 °C
MIN	2.3 °C
MAX	12.9 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	23.5 °C	Ø 50.5%
Ø	23.8 °C	
Ø	22.8 °C	
Ø	22.4 °C	



# Temperatur und Wärmebilanz im Dezember 2009

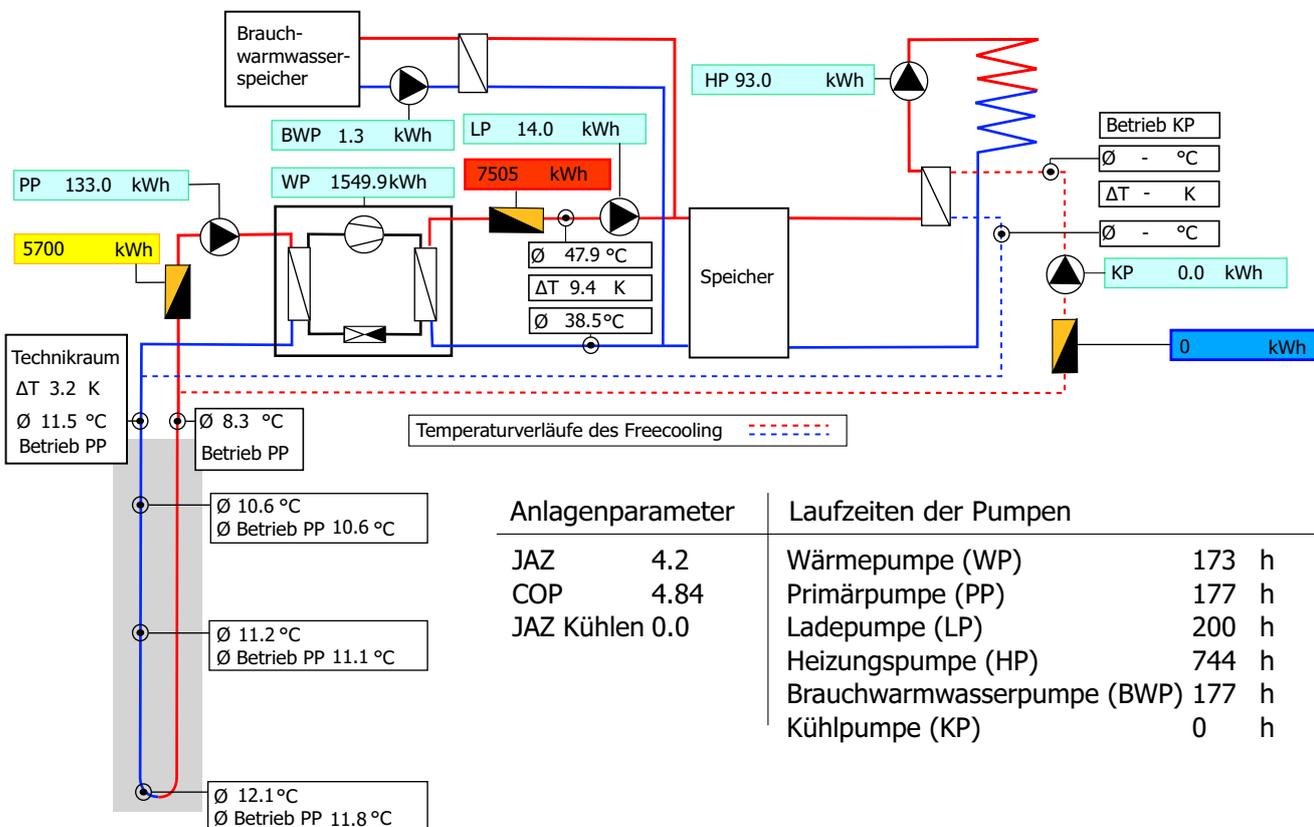


## Aussentemperatur

Ø	1.8 °C
MIN	-10.1 °C
MAX	7.4 °C

## Raumparameter

Temperatur	Luftfeuchtigkeit
Ø 22.6 °C	Ø 46.4 %
Ø 22.9 °C	
Ø 22.1 °C	
Ø 22.8 °C	



### Anlagenparameter

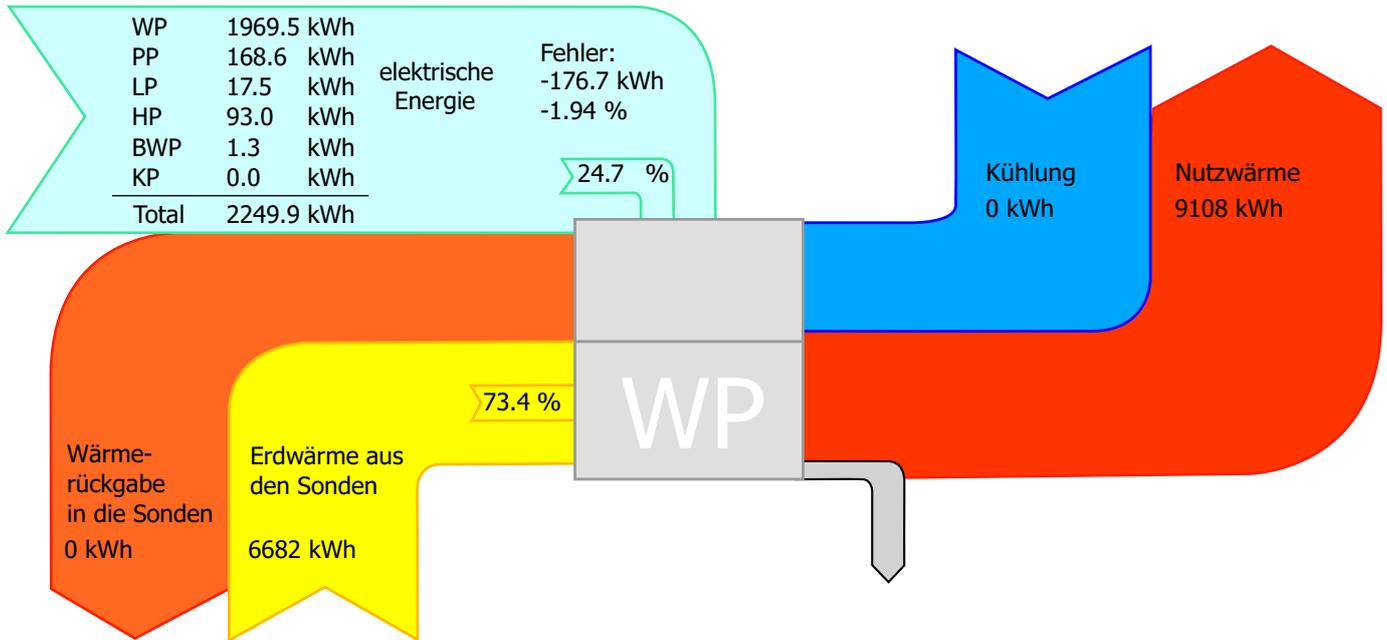
JAZ	4.2
COP	4.84
JAZ Kühlen	0.0

### Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	173 h
Primärpumpe (PP)	177 h
Ladepumpe (LP)	200 h
Heizungspumpe (HP)	744 h
Brauchwarmwasserpumpe (BWP)	177 h
Kühlpumpe (KP)	0 h



# Temperatur und Wärmebilanz im Januar 2010

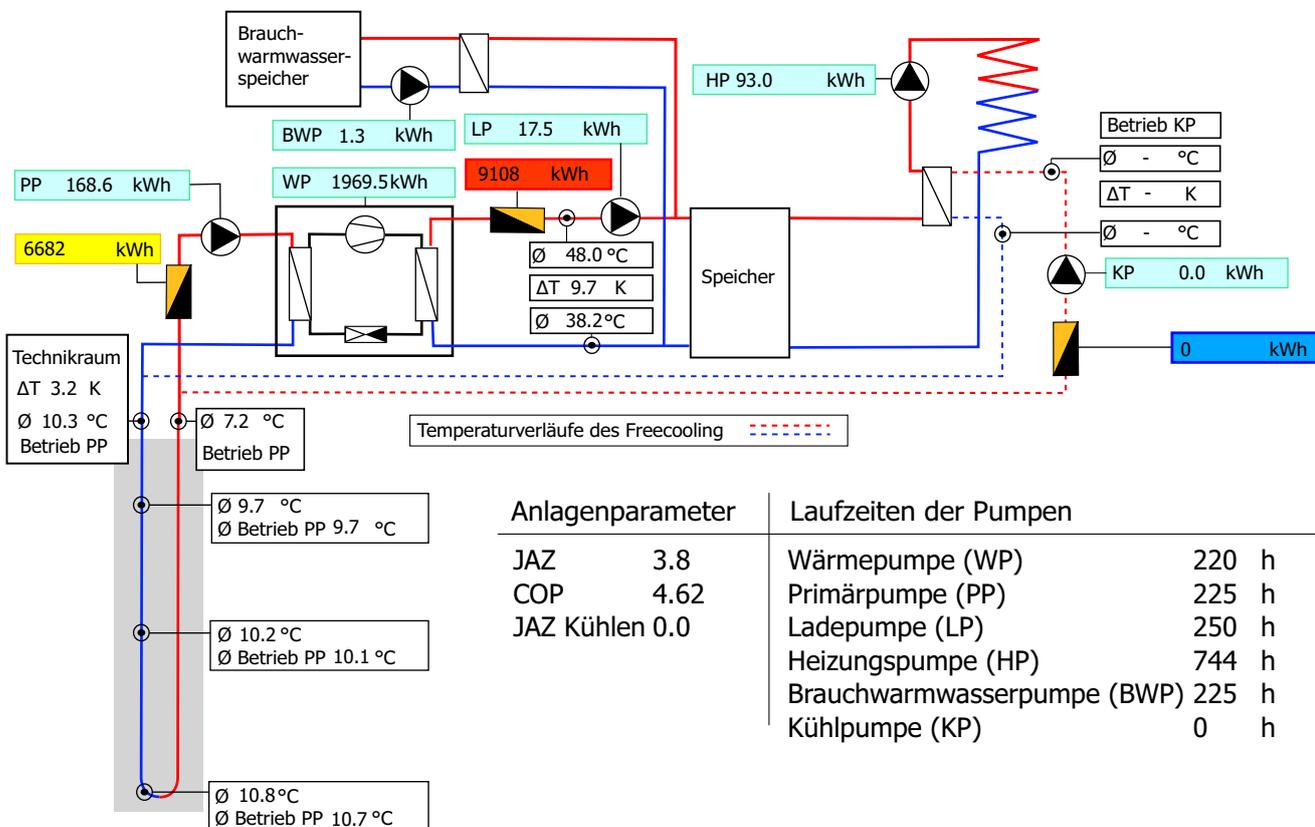


## Ausstemperatur

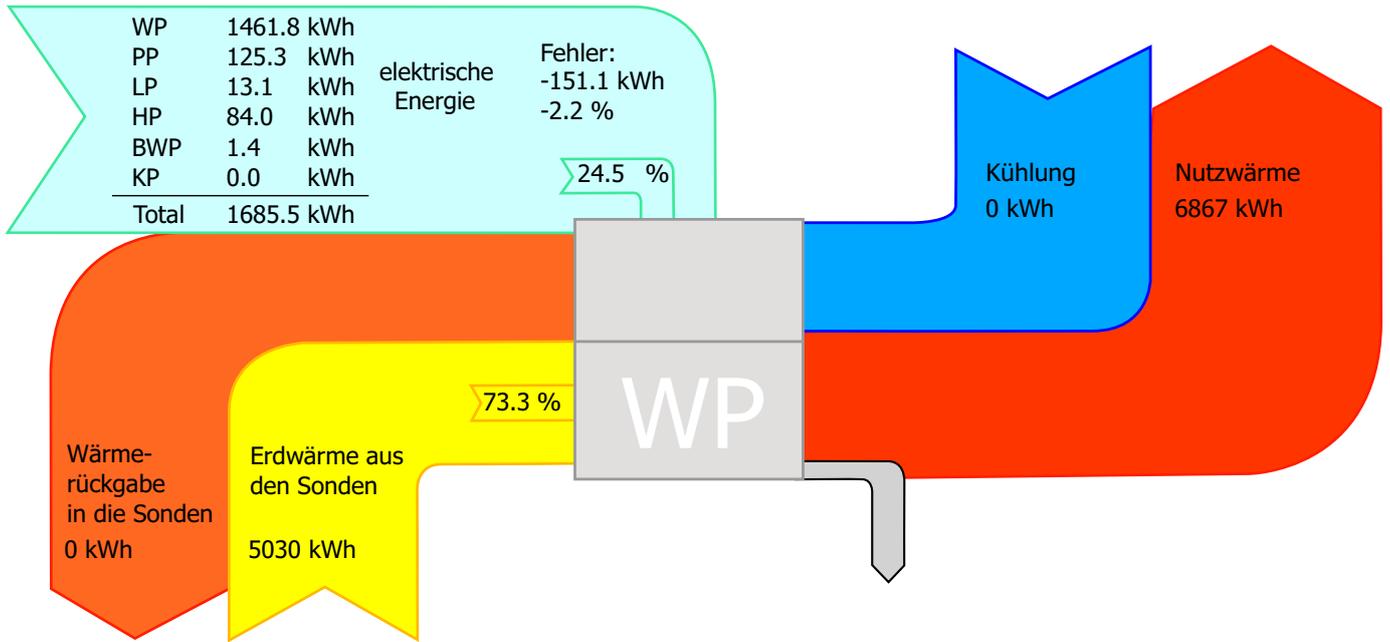
Ø	-0.2 °C
MIN	-6.1 °C
MAX	5.1 °C

## Raumparameter

Temperatur	Luftfeuchtigkeit
Ø 22.5 °C	Ø 43.4%
Ø 22.9 °C	
Ø 21.9 °C	
Ø 22.1 °C	



# Temperatur und Wärmebilanz im Februar 2010

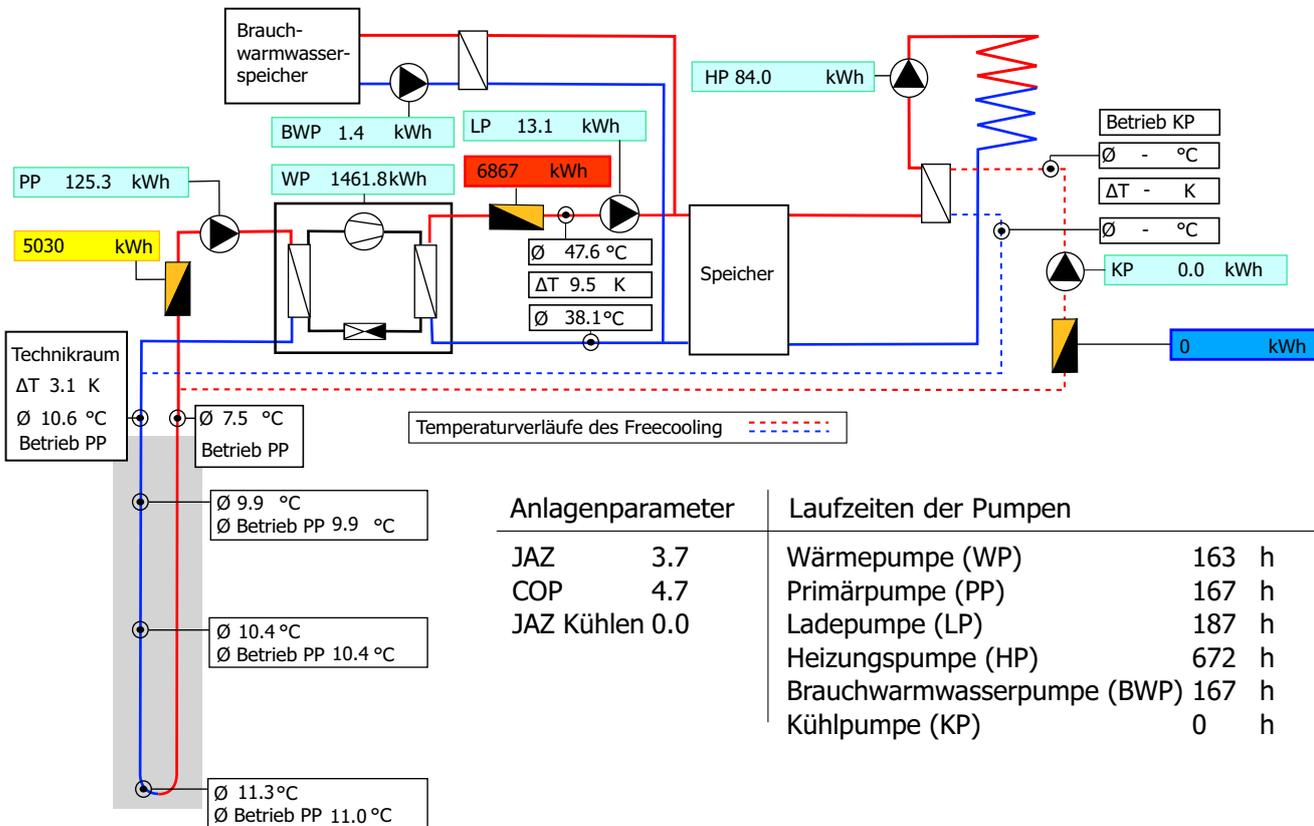


## Ausstemperatur

Ø	1.5 °C
MIN	-7.4 °C
MAX	11.0 °C

## Raumparameter

Temperaturen	Luftfeuchtigkeit
Ø 22.9 °C	Ø 41.5%
Ø 23.2 °C	
Ø 22.1 °C	
Ø 21.5 °C	



### Anlagenparameter

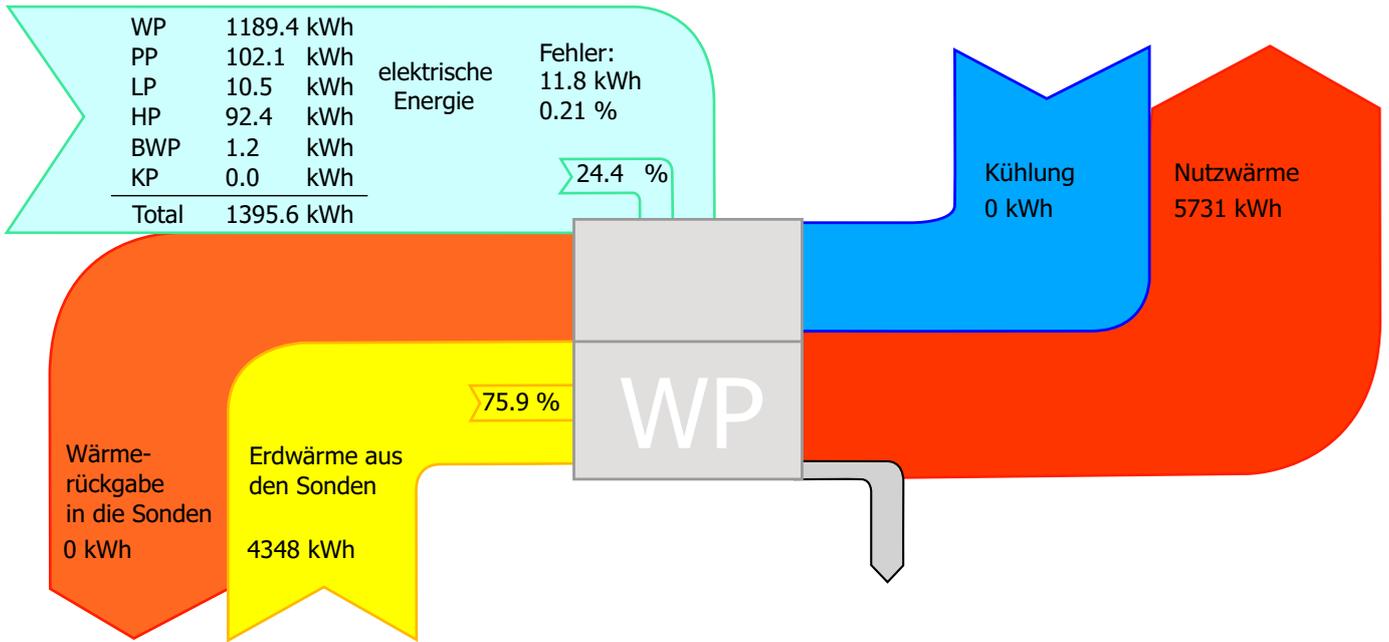
JAZ	3.7
COP	4.7
JAZ Kühlen	0.0

### Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	163 h
Primärpumpe (PP)	167 h
Ladepumpe (LP)	187 h
Heizungspumpe (HP)	672 h
Brauchwärmwasserpumpe (BWP)	167 h
Kühlpumpe (KP)	0 h



Temperatur und Wärmebilanz im März 2010

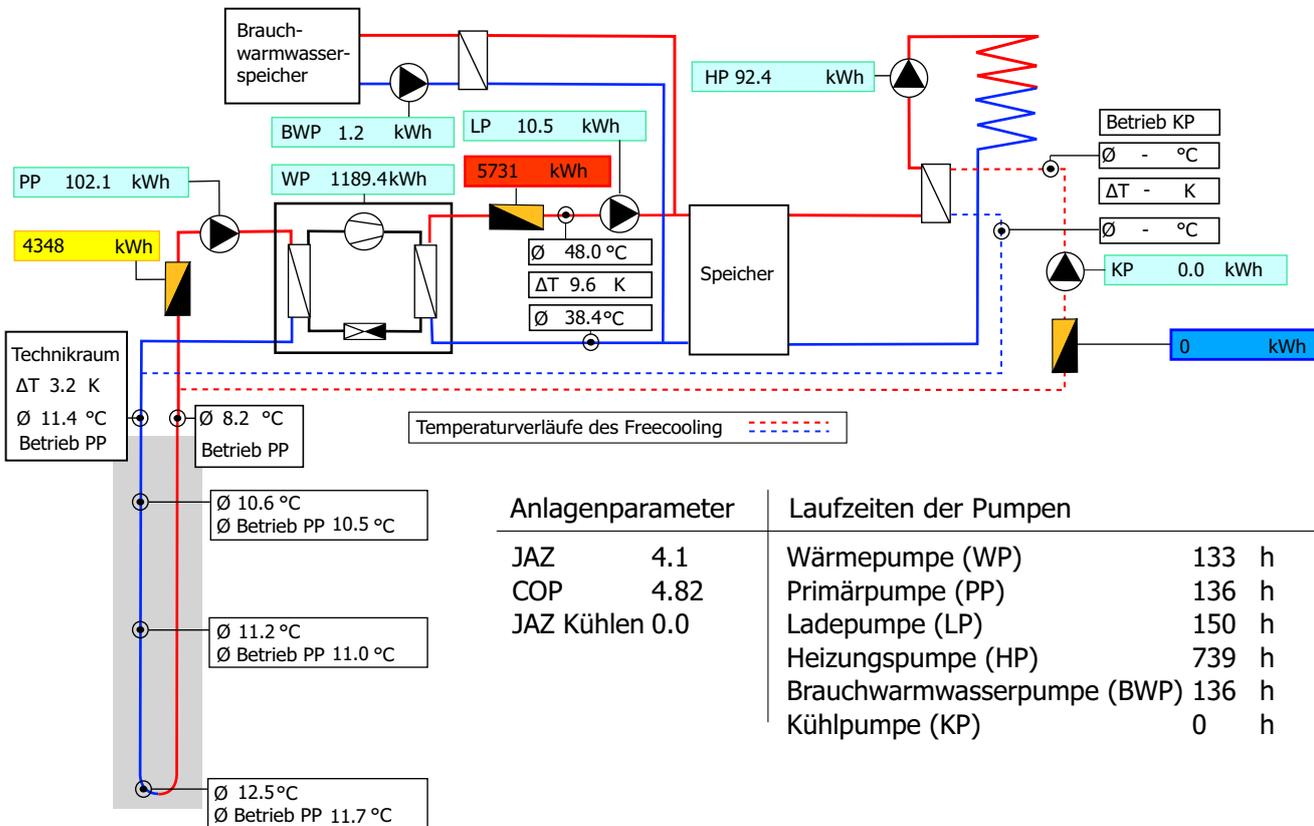


Ausstemperatur

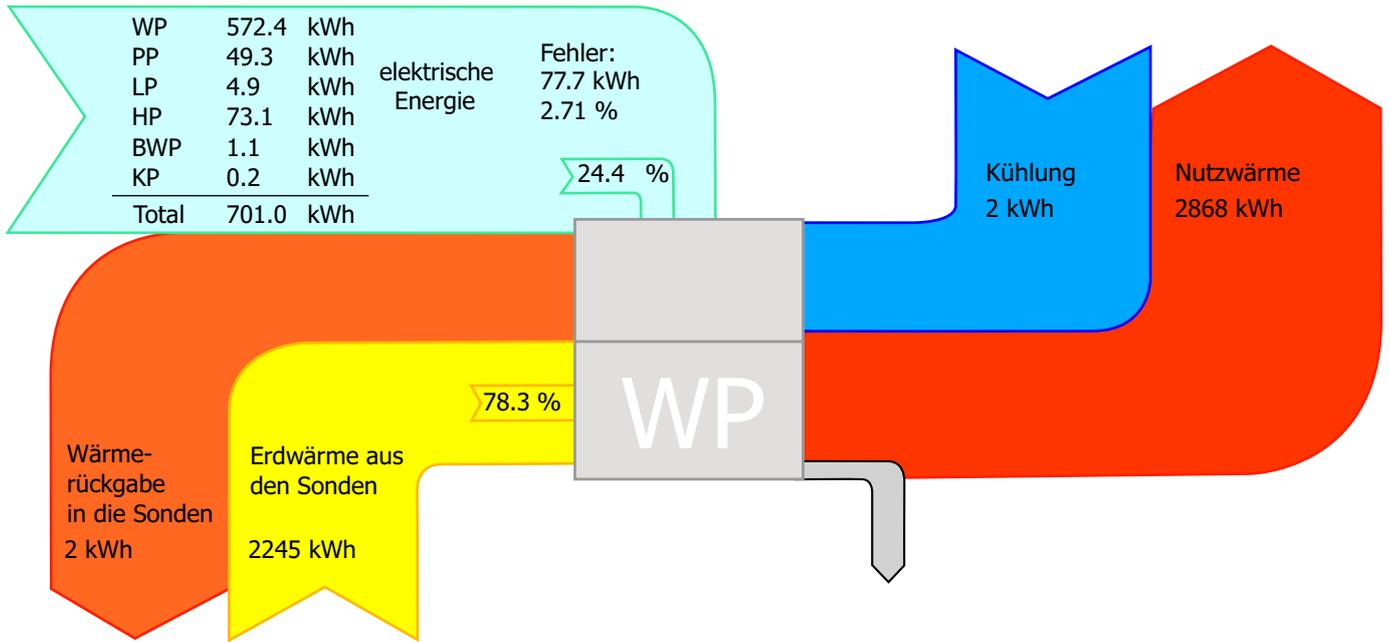
Ø	5.3 °C
MIN	-5.0 °C
MAX	15.9 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	23.2 °C	Ø 39.0%
Ø	23.6 °C	
Ø	22.7 °C	
Ø	22.3 °C	



Temperatur und Wärmebilanz im April 2010

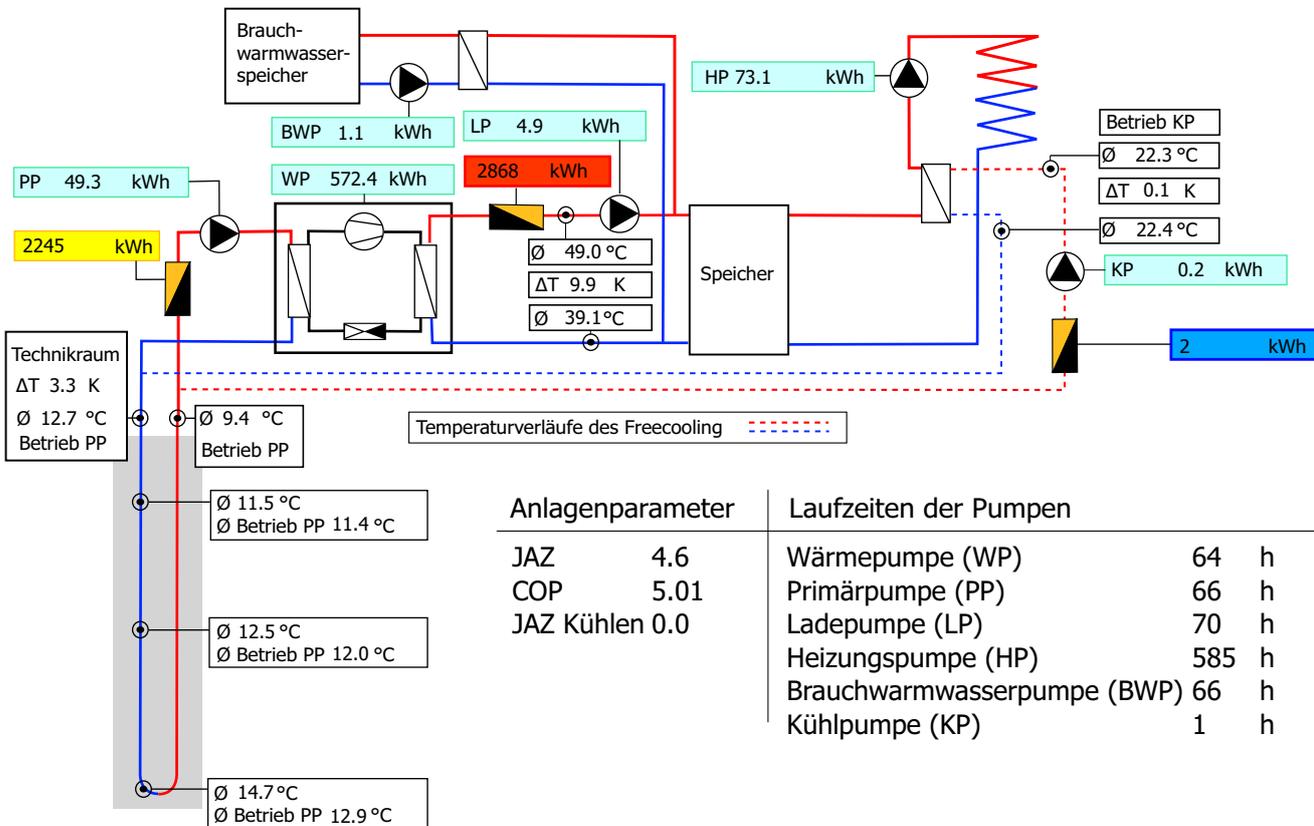


Ausstemperatur

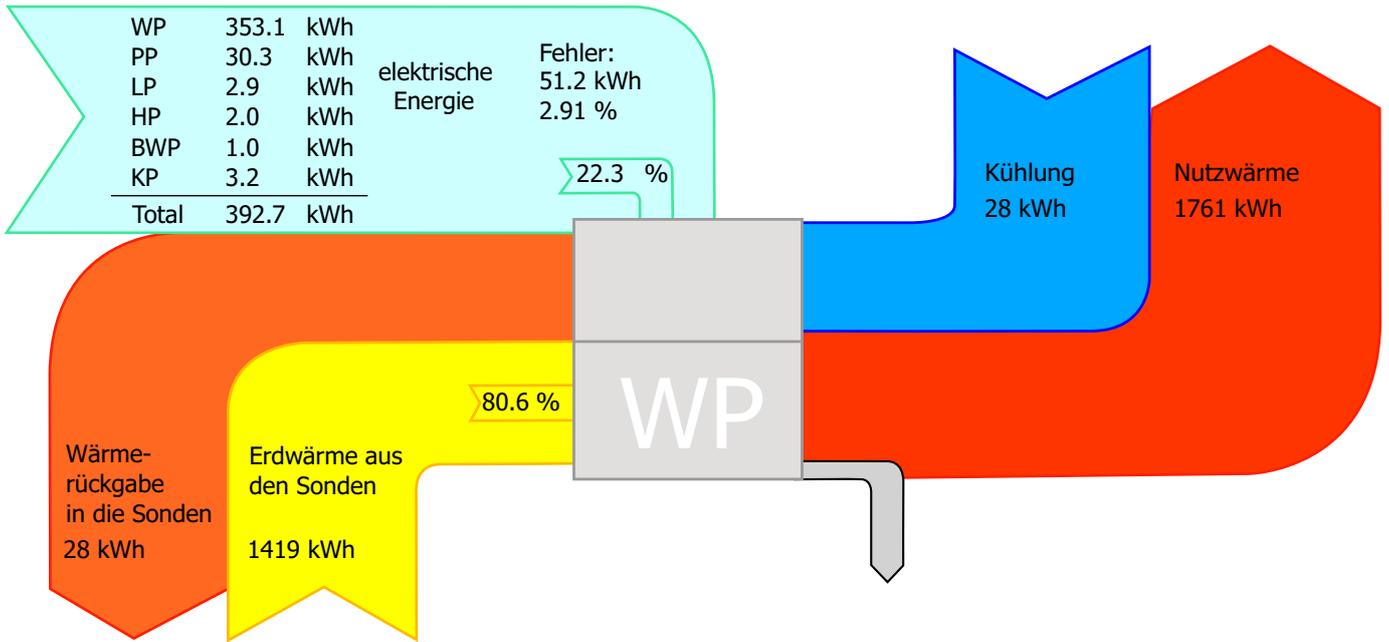
Ø	11.4 °C
MIN	3.1 °C
MAX	23.2 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	23.5 °C	Ø 41.7%
Ø	23.9 °C	
Ø	23.1 °C	
Ø	22.5 °C	



Temperatur und Wärmebilanz im Mai 2010

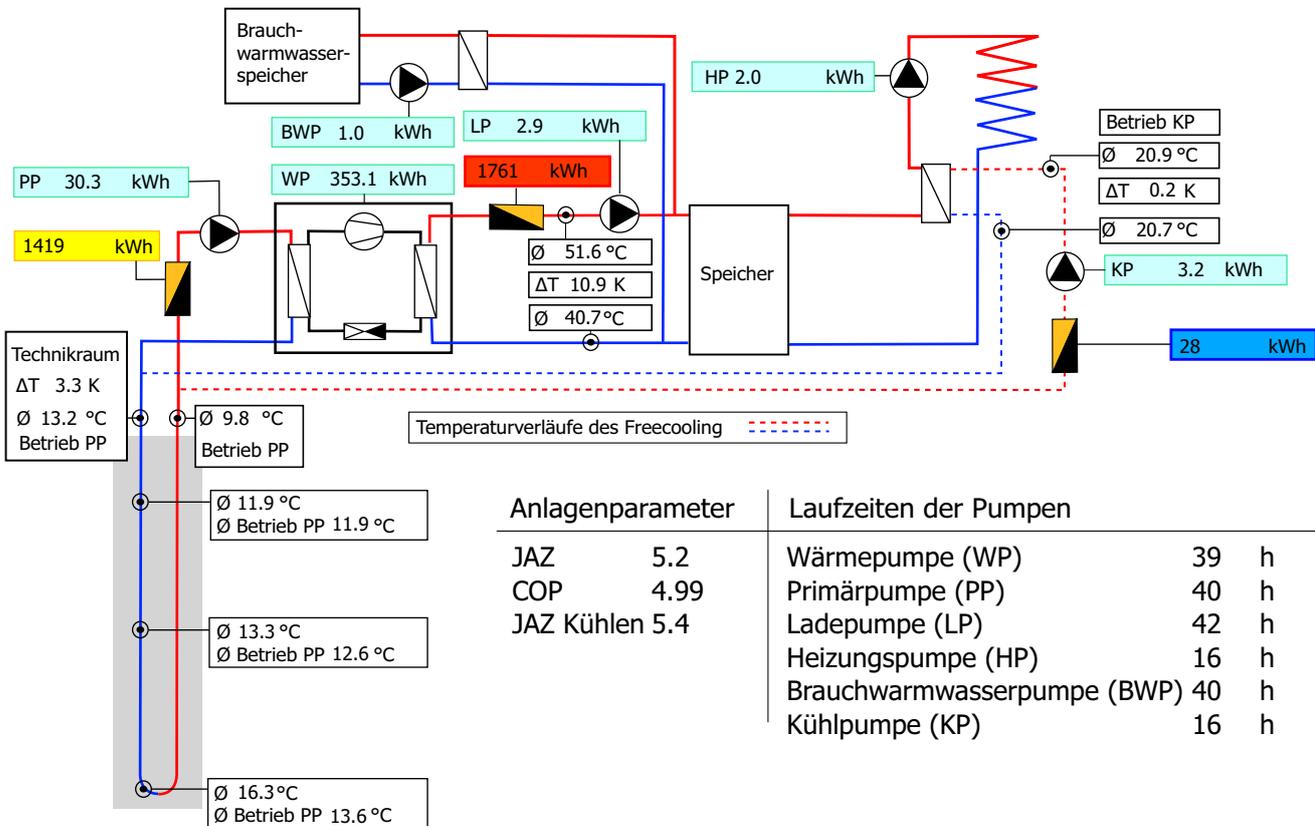


Ausstemperatur

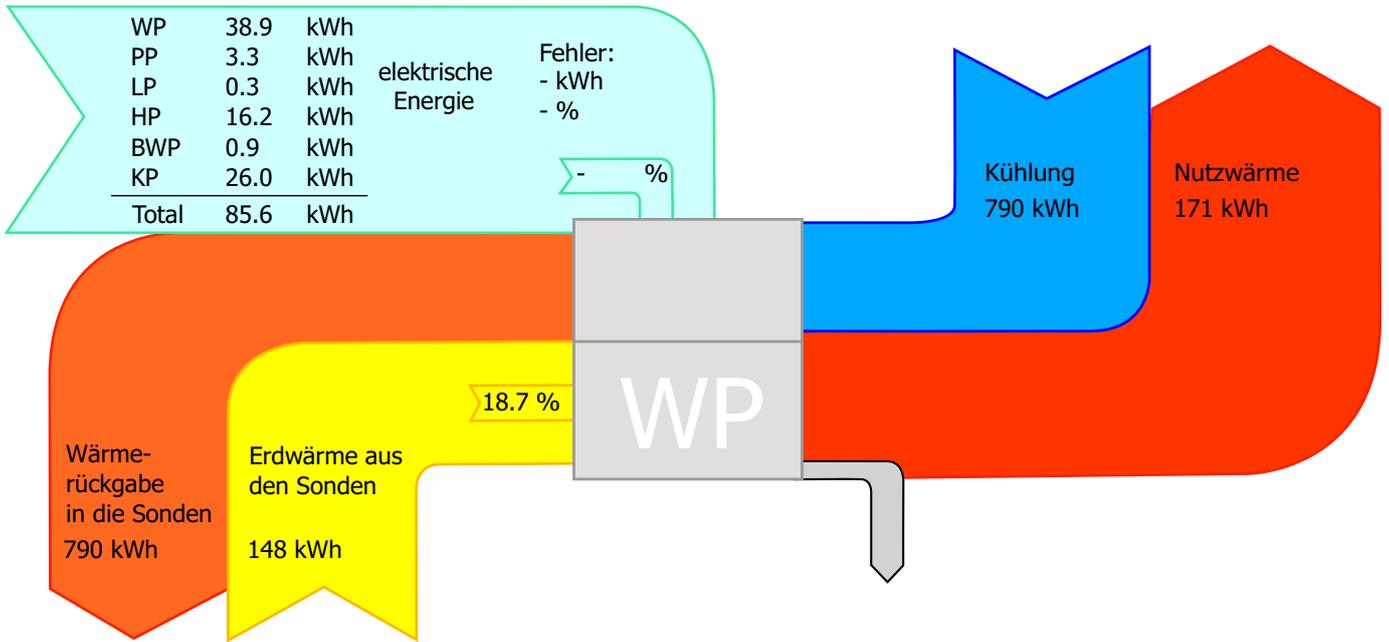
Ø	13.6 °C
MIN	7.2 °C
MAX	25.5 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	23.6 °C	Ø 48.2%
Ø	24.0 °C	
Ø	23.2 °C	
Ø	22.5 °C	



Temperatur und Wärmebilanz im Juni 2010

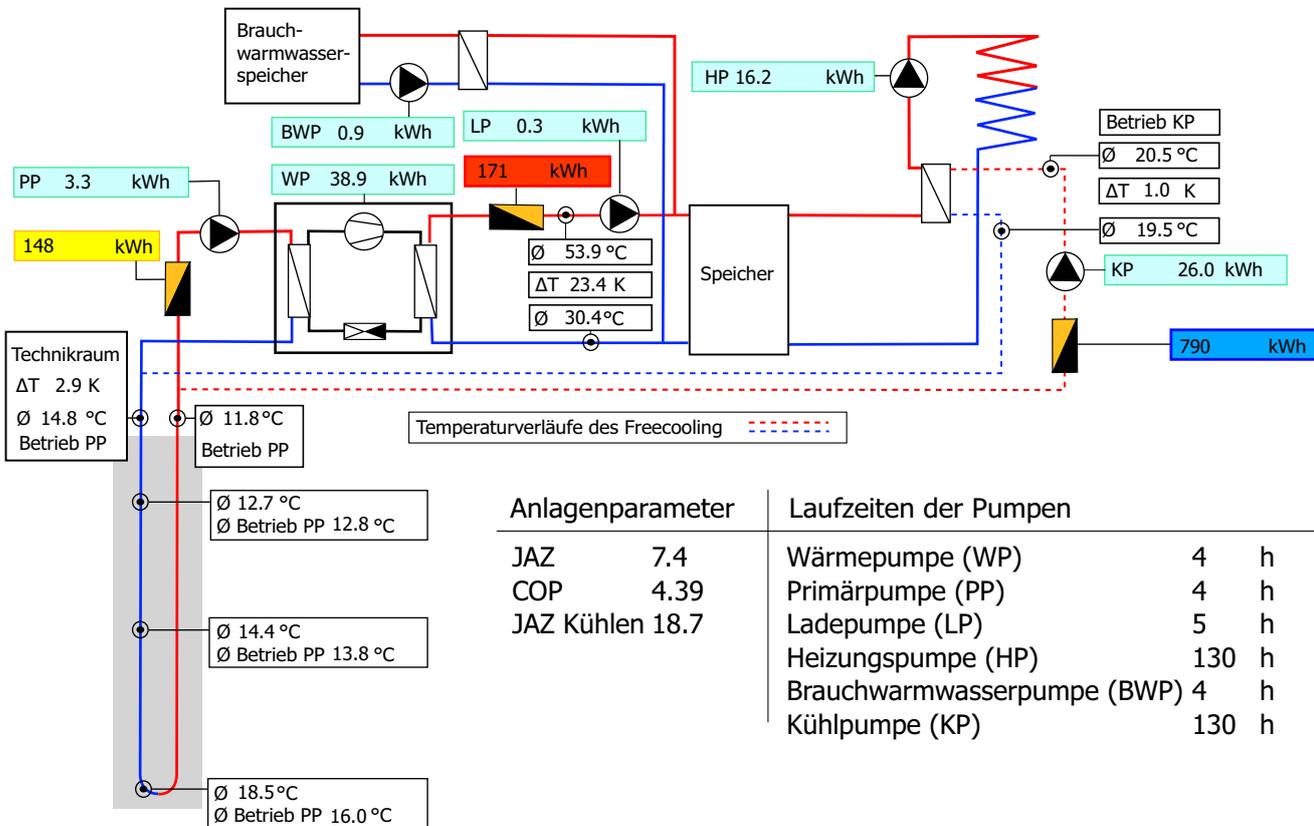


Ausstemperatur

Ø	18.8 °C
MIN	11.4 °C
MAX	29.1 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit	
Ø	24.1 °C	Ø	53.5%
Ø	24.6 °C		
Ø	23.7 °C		
Ø	22.7 °C		



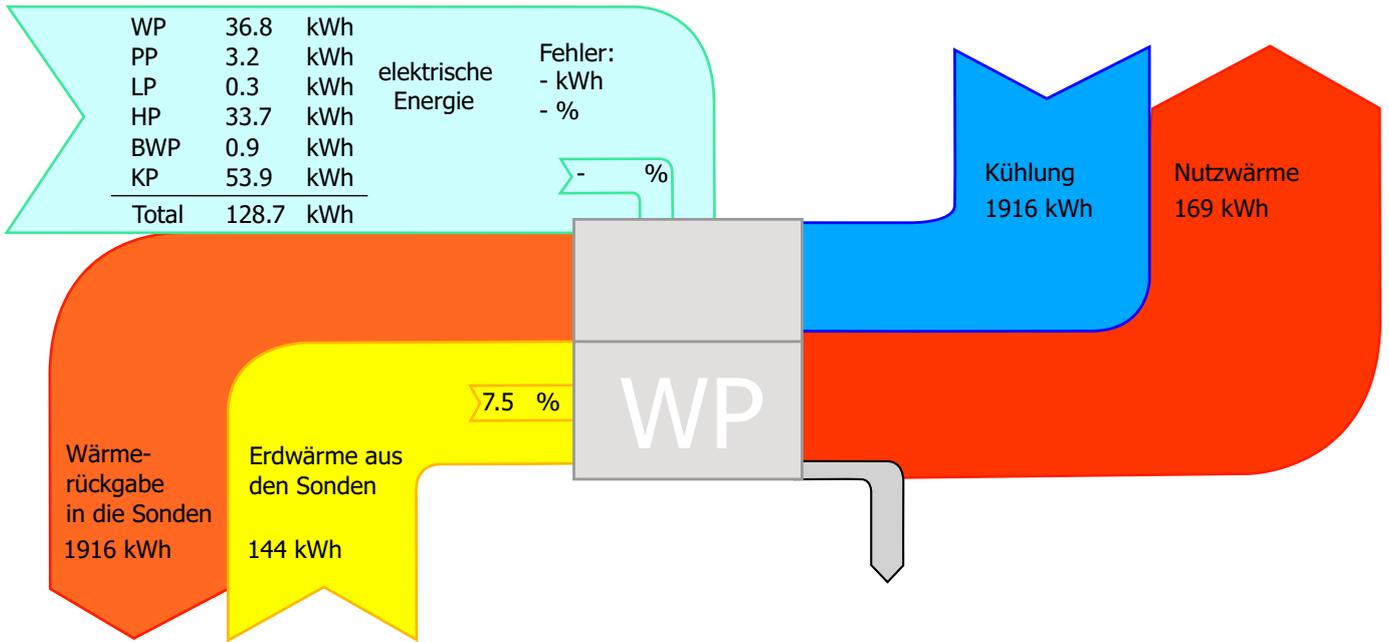
Anlagenparameter

JAZ	7.4
COP	4.39
JAZ Kühlen	18.7

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	4	h
Primärpumpe (PP)	4	h
Ladepumpe (LP)	5	h
Heizungspumpe (HP)	130	h
Brauchwarmwasserpumpe (BWP)	4	h
Kühlpumpe (KP)	130	h

Temperatur und Wärmebilanz im Juli 2010

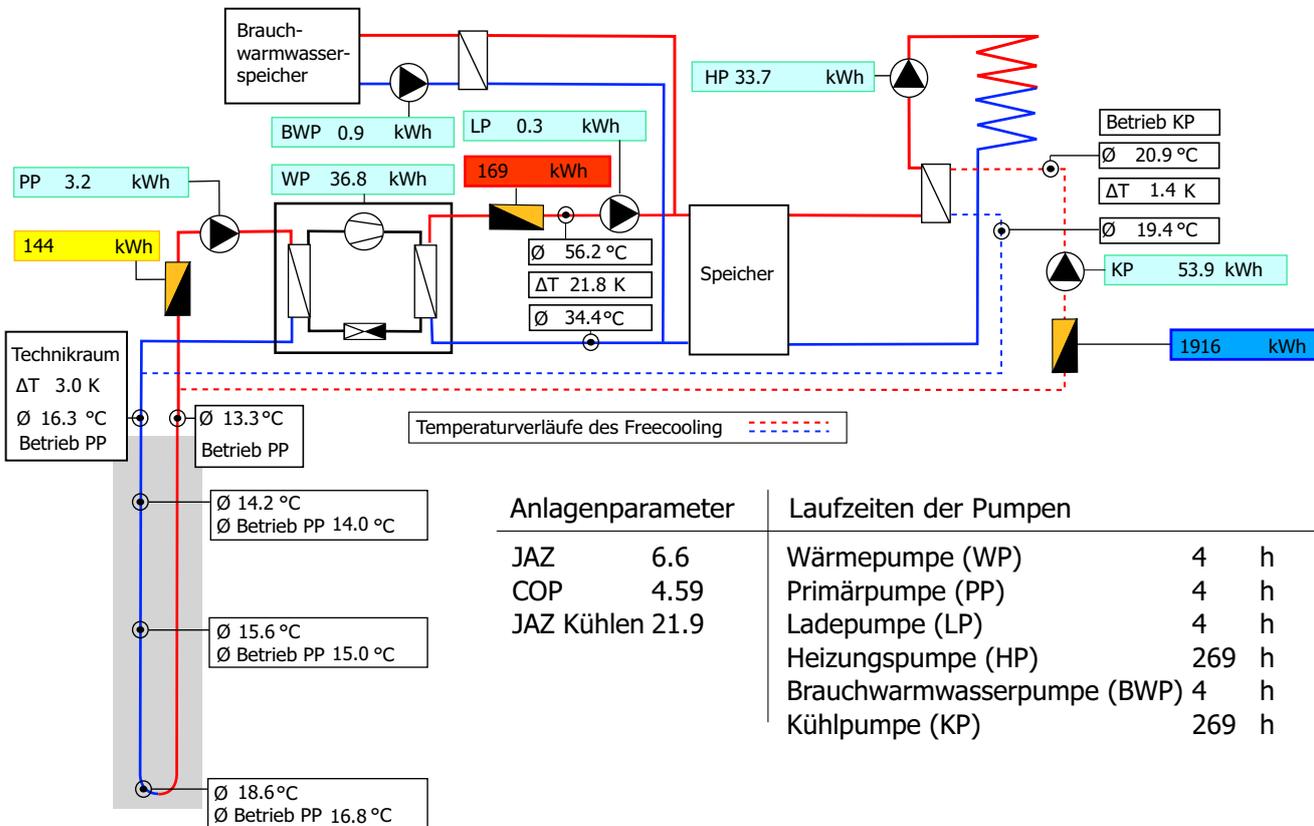


Ausstemperatur

Ø	22.2 °C
MIN	14.1 °C
MAX	30.7 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	24.2 °C	Ø 62.5%
Ø	24.8 °C	
Ø	23.8 °C	
Ø	22.2 °C	



Anlagenparameter

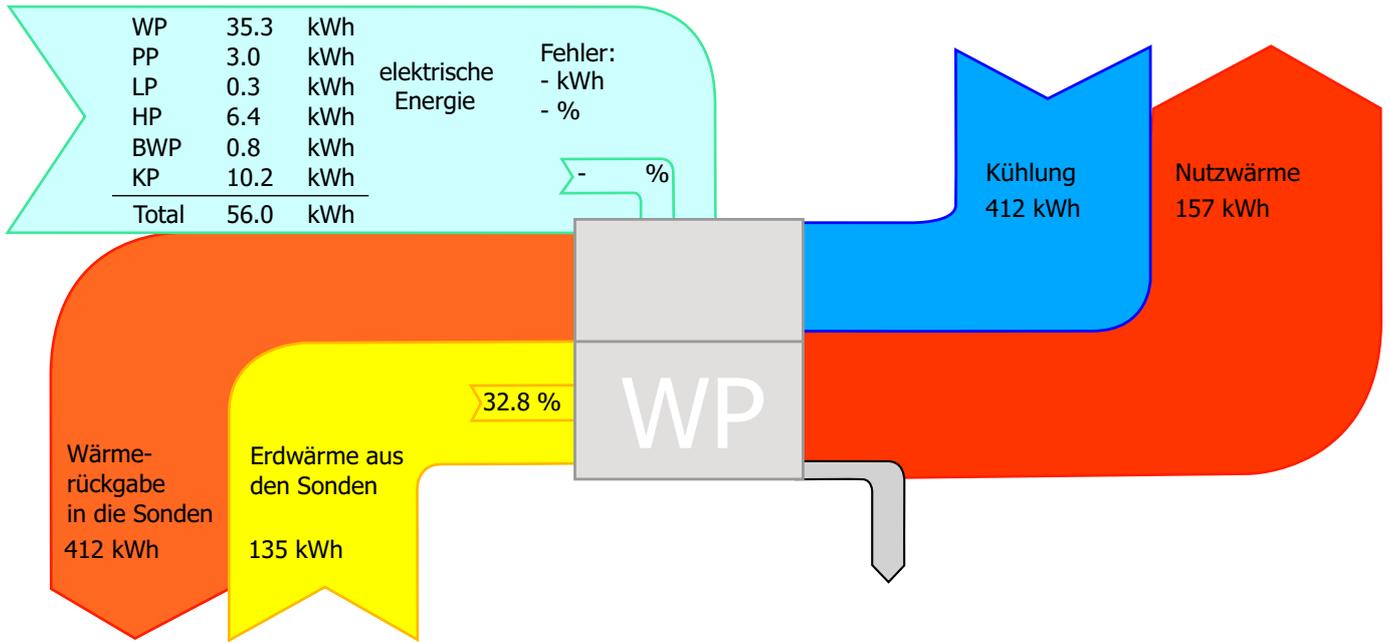
JAZ	6.6
COP	4.59
JAZ Kühlen	21.9

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	4	h
Primärpumpe (PP)	4	h
Ladepumpe (LP)	4	h
Heizungspumpe (HP)	269	h
Brauchwärmwasserpumpe (BWP)	4	h
Kühlpumpe (KP)	269	h



Temperatur und Wärmebilanz im August 2010

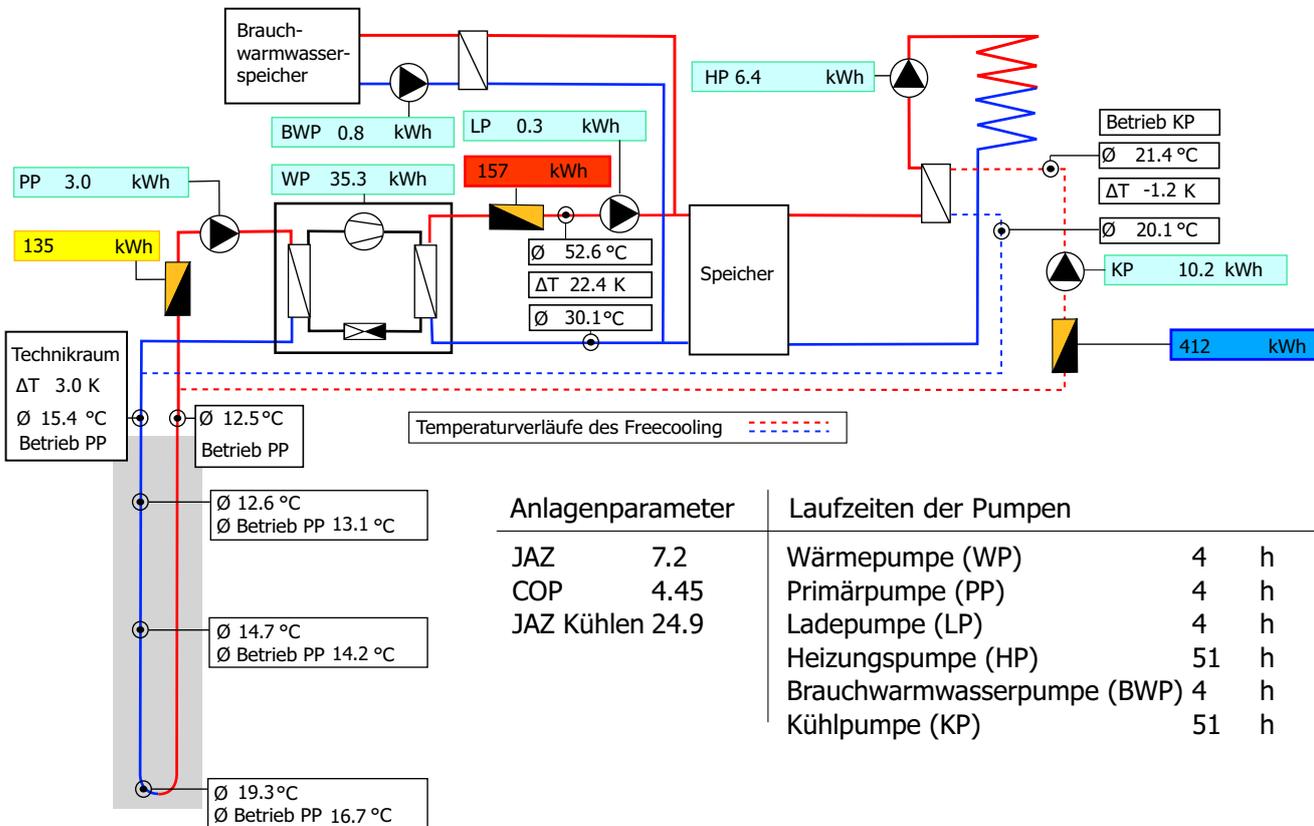


Ausstemperatur

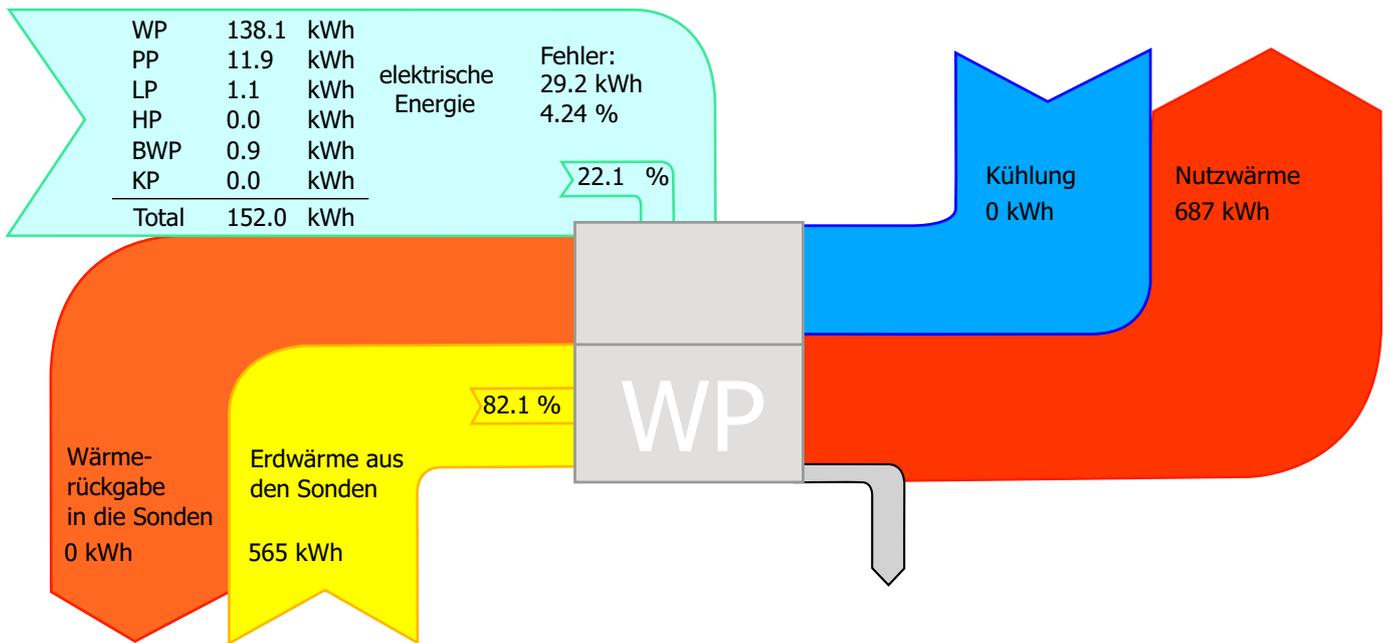
Ø	18.9 °C
MIN	12.6 °C
MAX	26.6 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	24.5 °C	Ø 57.5%
Ø	25.0 °C	
Ø	24.1 °C	
Ø	23.3 °C	



# Temperatur und Wärmebilanz im September 2010

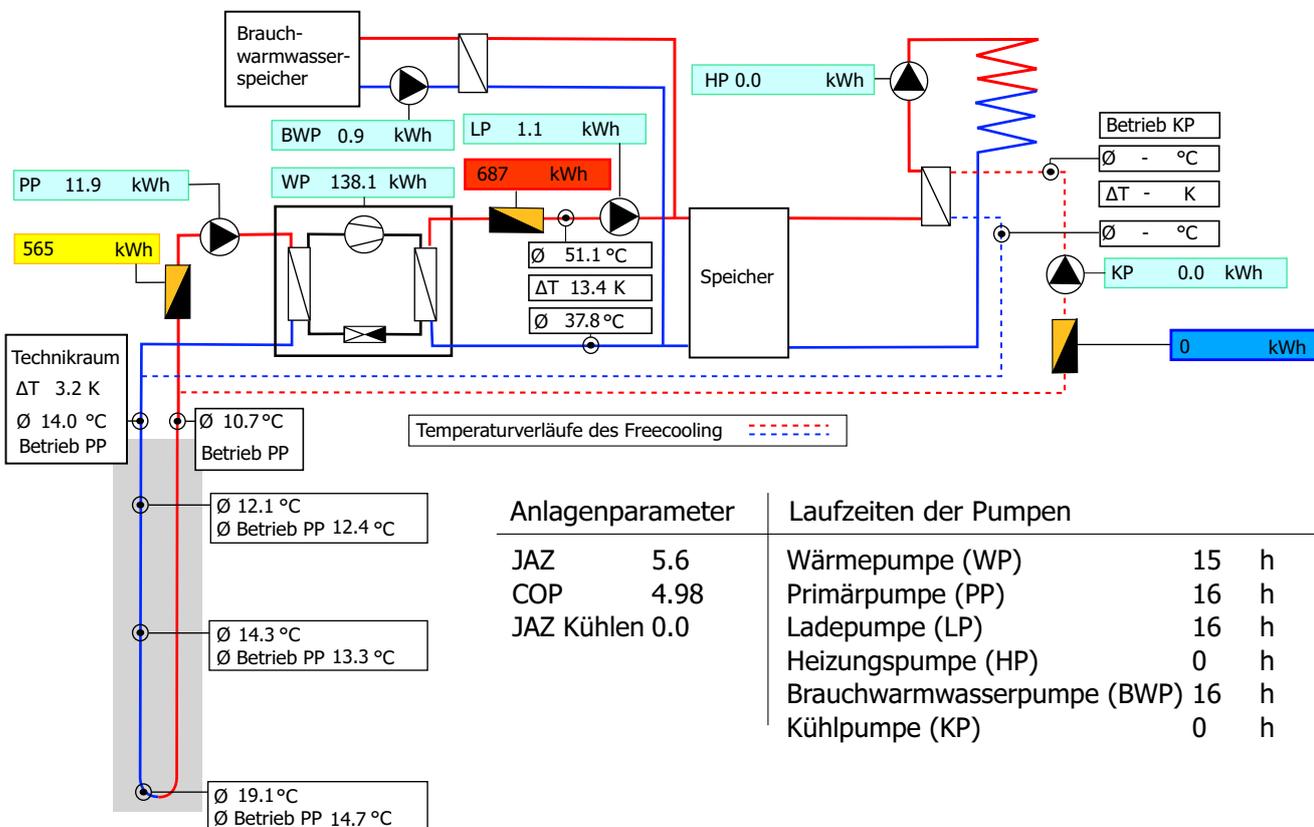


## Ausstemperatur

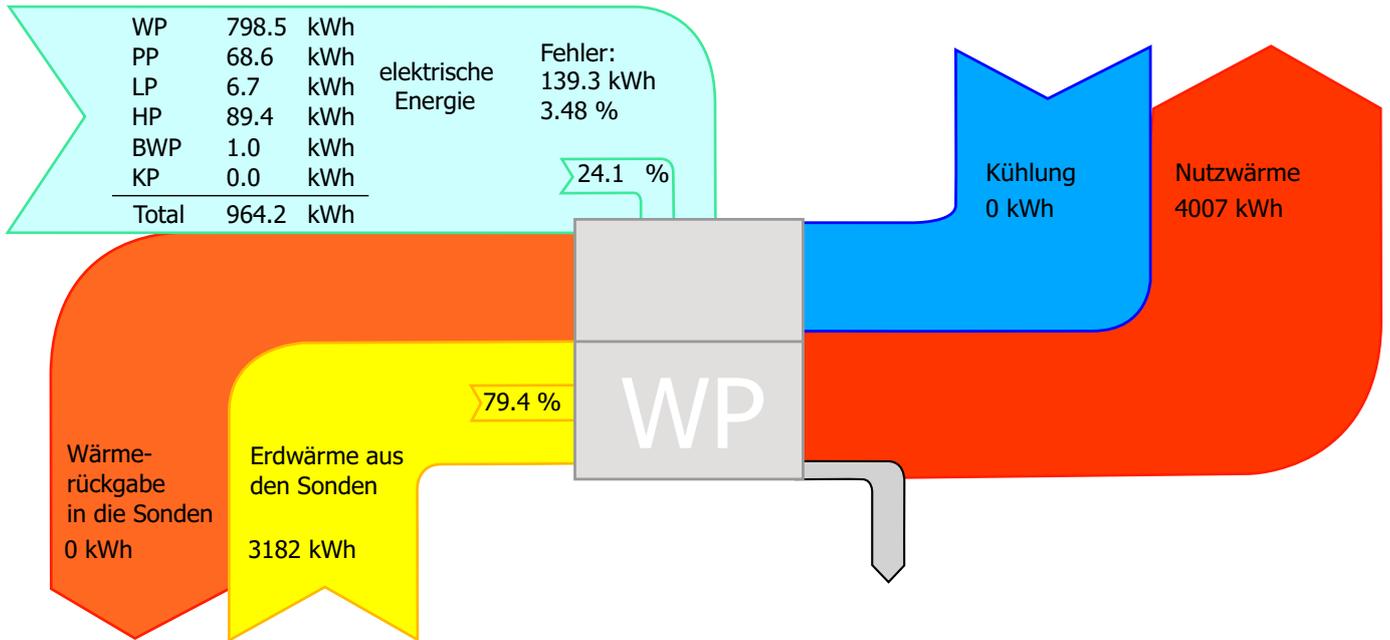
Ø	14.7 °C
MIN	8.8 °C
MAX	20.7 °C

## Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	23.7 °C	Ø 51.6%
Ø	24.2 °C	
Ø	23.3 °C	
Ø	22.7 °C	



# Temperatur und Wärmebilanz im Oktober 2010

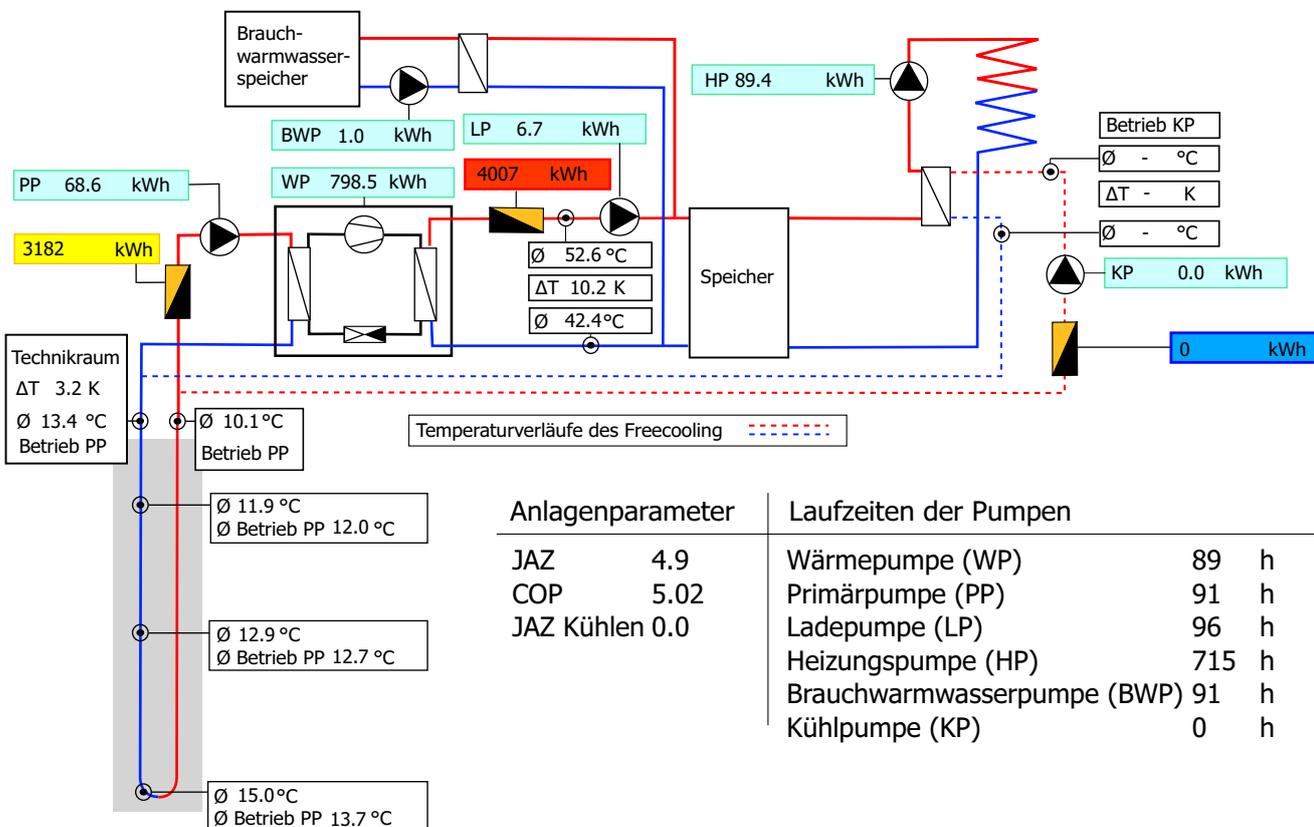


## Ausstemperatur

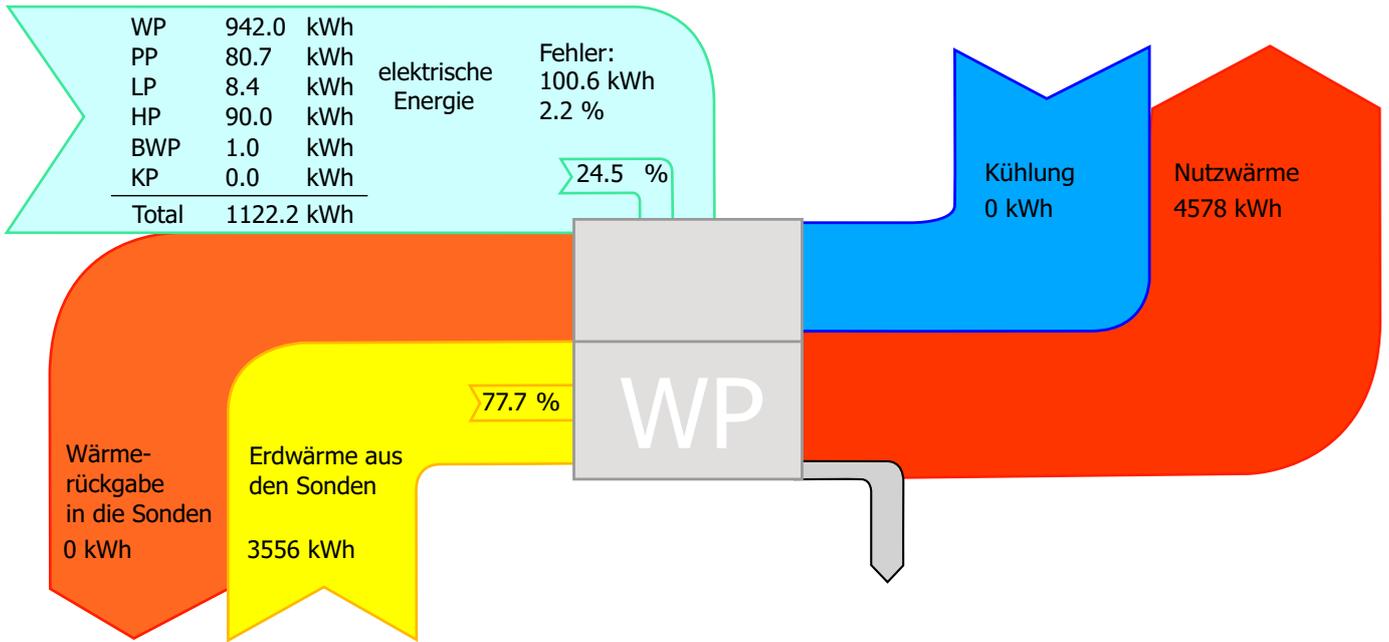
Ø	9.9 °C
MIN	2.0 °C
MAX	19.3 °C

## Raumparameter

Temperatur	Luftfeuchtigkeit
Ø 23.3 °C	Ø 48.5%
Ø 23.7 °C	
Ø 22.8 °C	
Ø 22.2 °C	



Temperatur und Wärmebilanz im November 2010

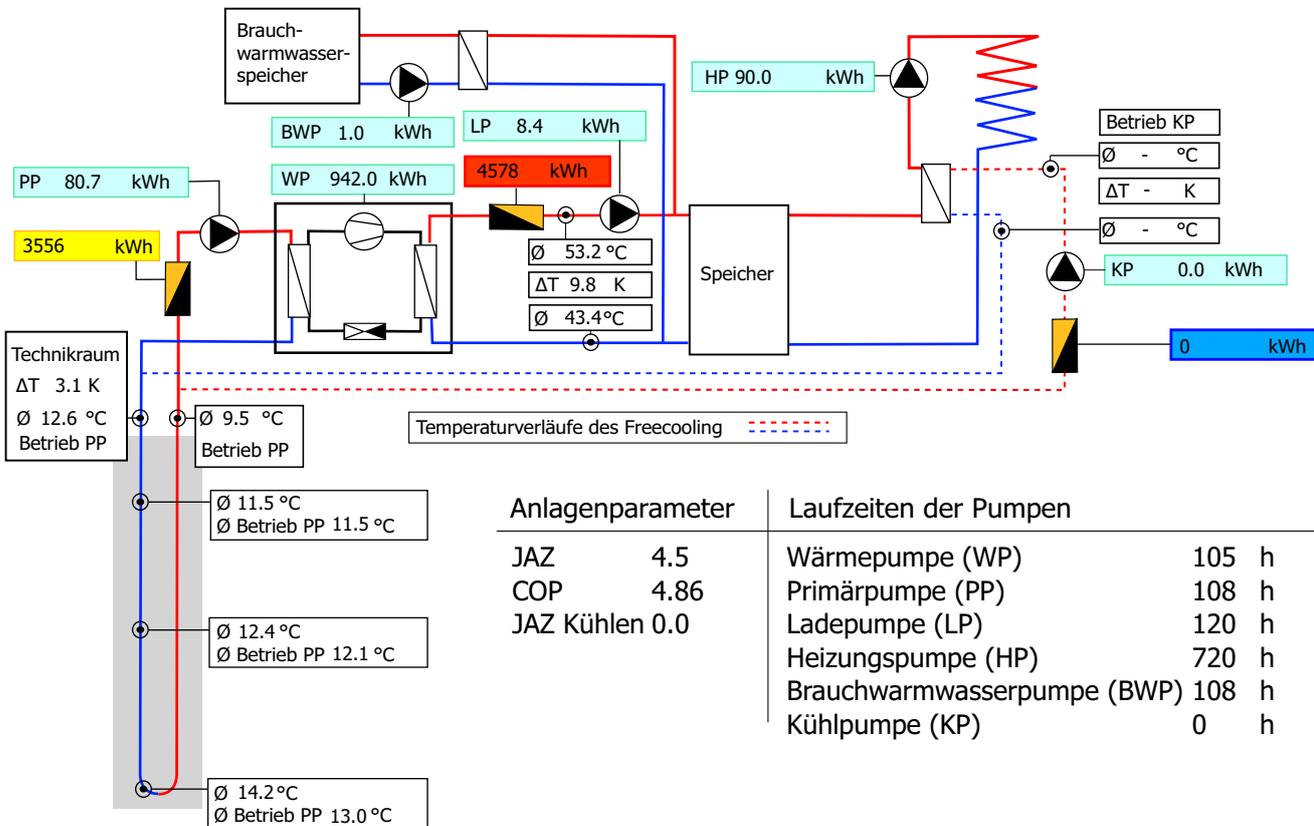


Ausstemperatur

Ø	6.5 °C
MIN	-5.2 °C
MAX	14.8 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	22.8 °C	Ø 49.7%
Ø	23.3 °C	
Ø	22.4 °C	
Ø	21.8 °C	



Anlagenparameter

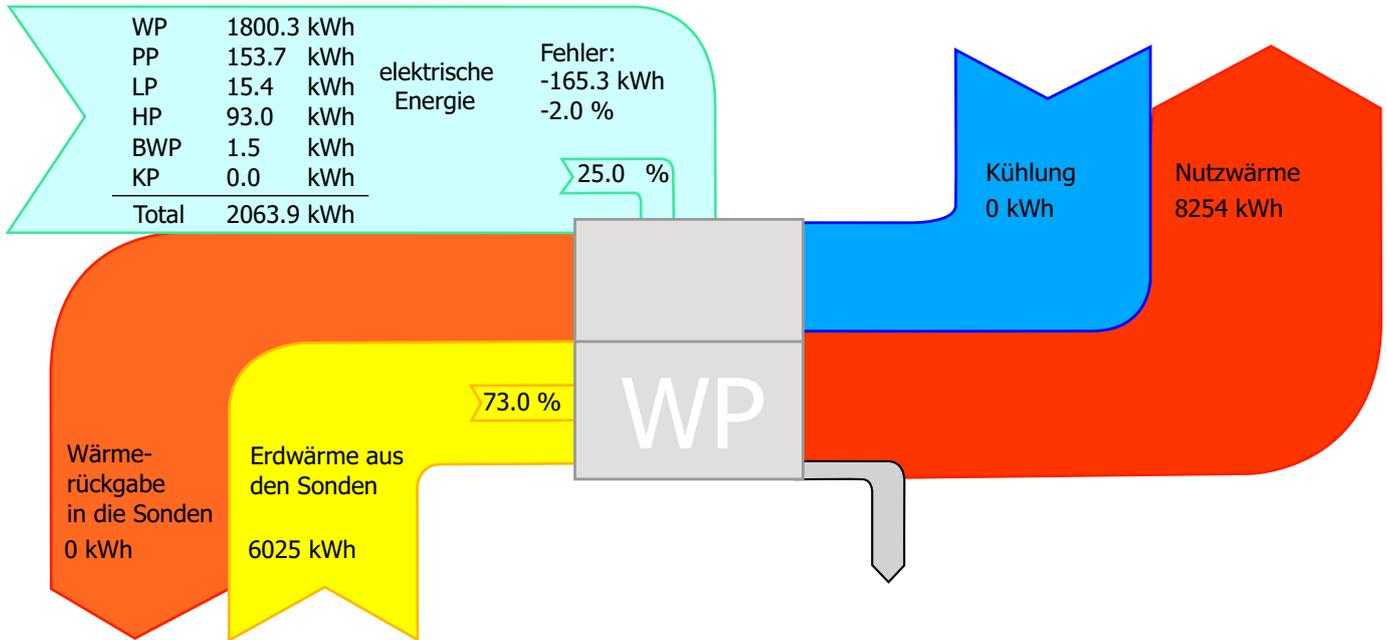
JAZ	4.5
COP	4.86
JAZ Kühlen	0.0

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	105 h
Primärpumpe (PP)	108 h
Ladepumpe (LP)	120 h
Heizungspumpe (HP)	720 h
Brauchwarmwasserpumpe (BWP)	108 h
Kühlpumpe (KP)	0 h



# Temperatur und Wärmebilanz im Dezember 2010

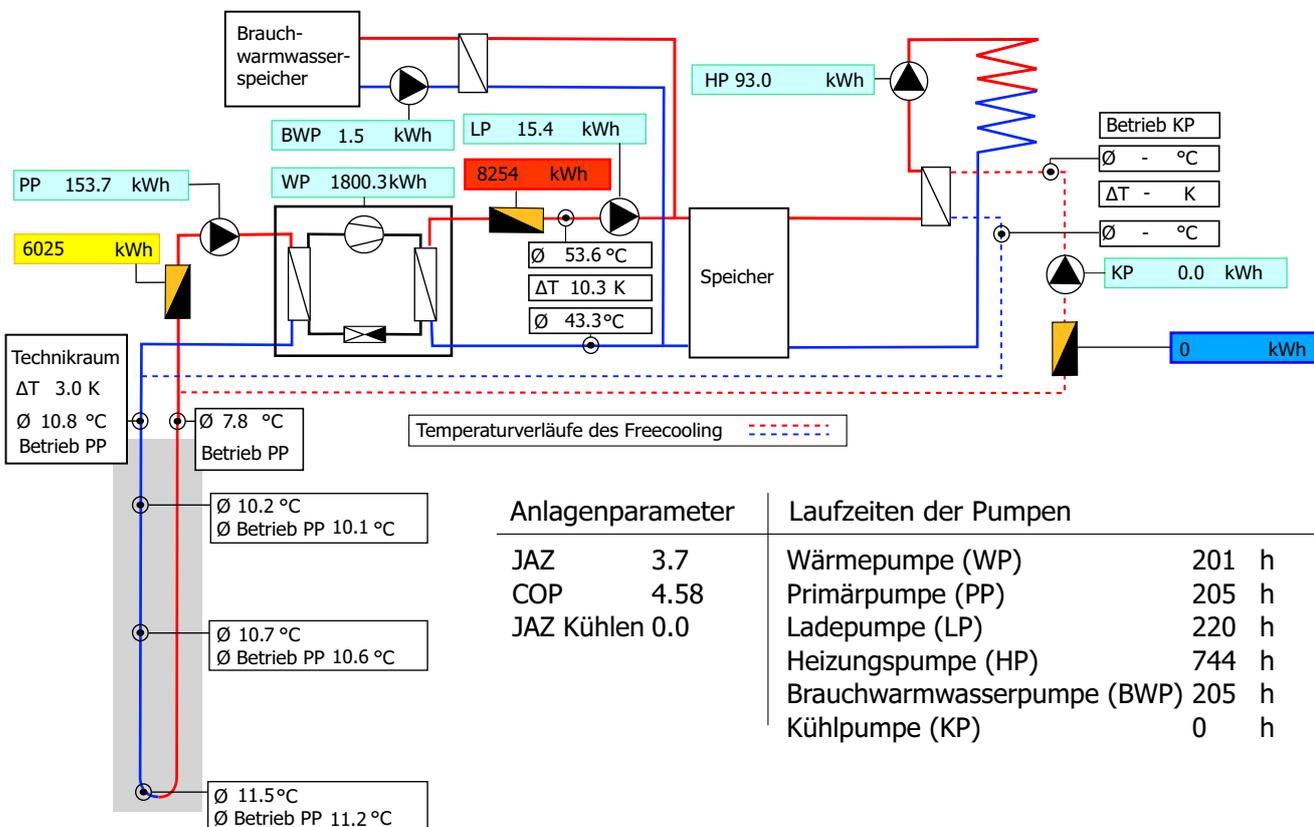


## Ausstemperatur

Ø	0.2 °C
MIN	-6.5 °C
MAX	7.3 °C

## Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit	
Ø	22.4 °C	Ø	44.9%
Ø	22.9 °C		
Ø	22.2 °C		
Ø	24.2 °C		



### Anlagenparameter

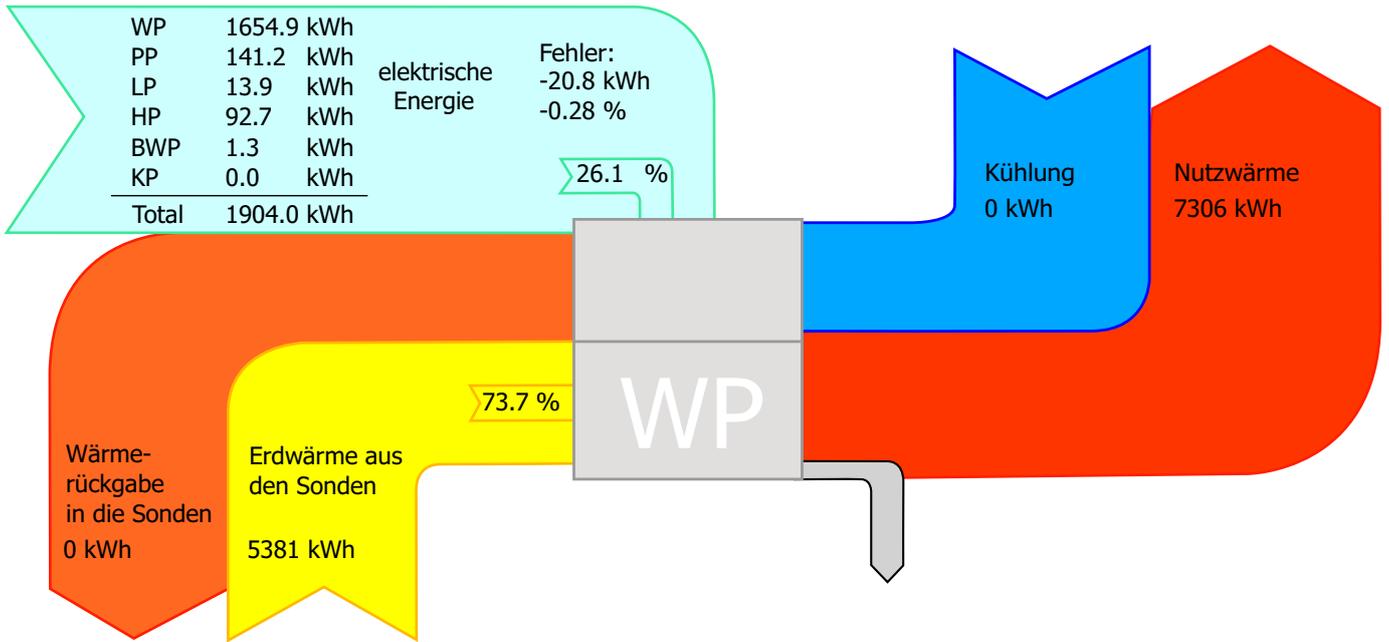
JAZ	3.7
COP	4.58
JAZ Kühlen	0.0

### Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	201 h
Primärpumpe (PP)	205 h
Ladepumpe (LP)	220 h
Heizungspumpe (HP)	744 h
Brauchwärmwasserpumpe (BWP)	205 h
Kühlpumpe (KP)	0 h



# Temperatur und Wärmebilanz im Januar 2011

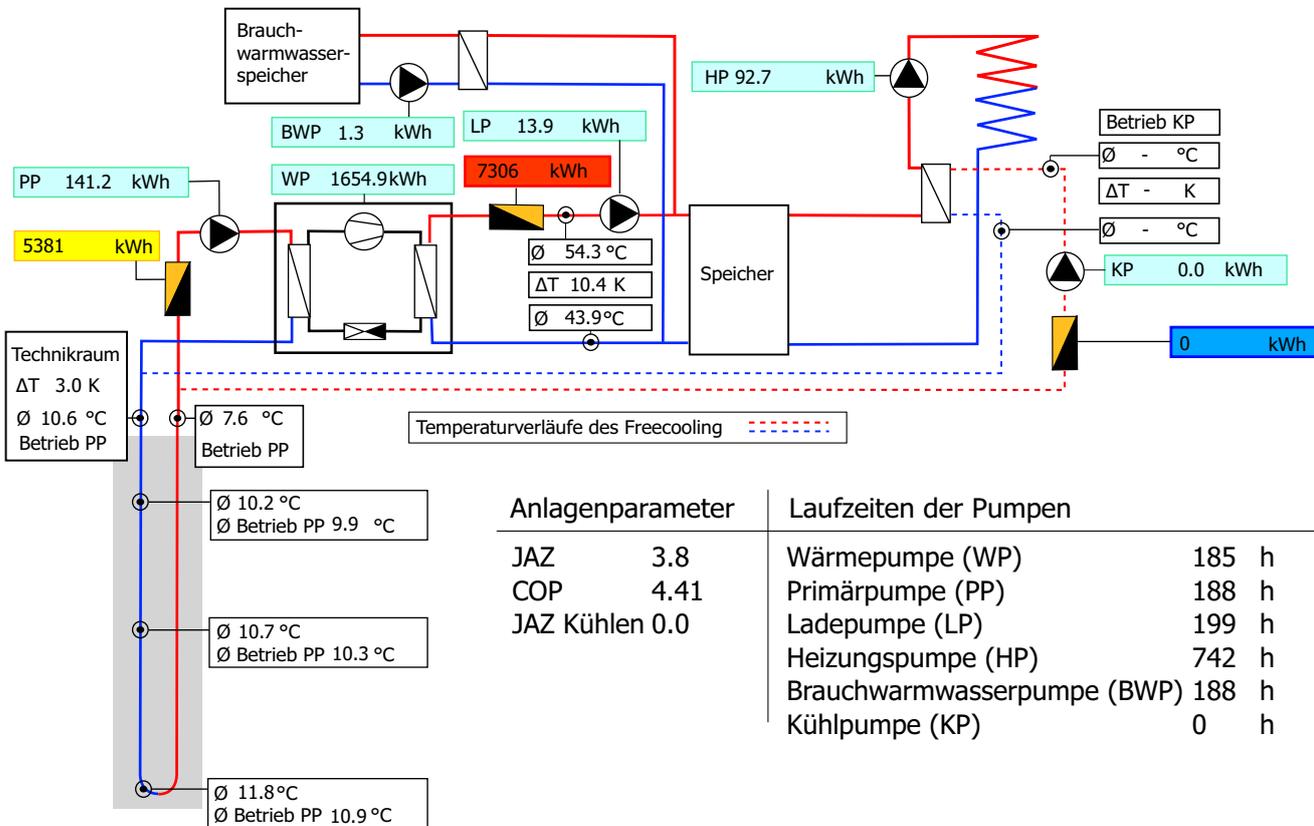


## Ausstemperatur

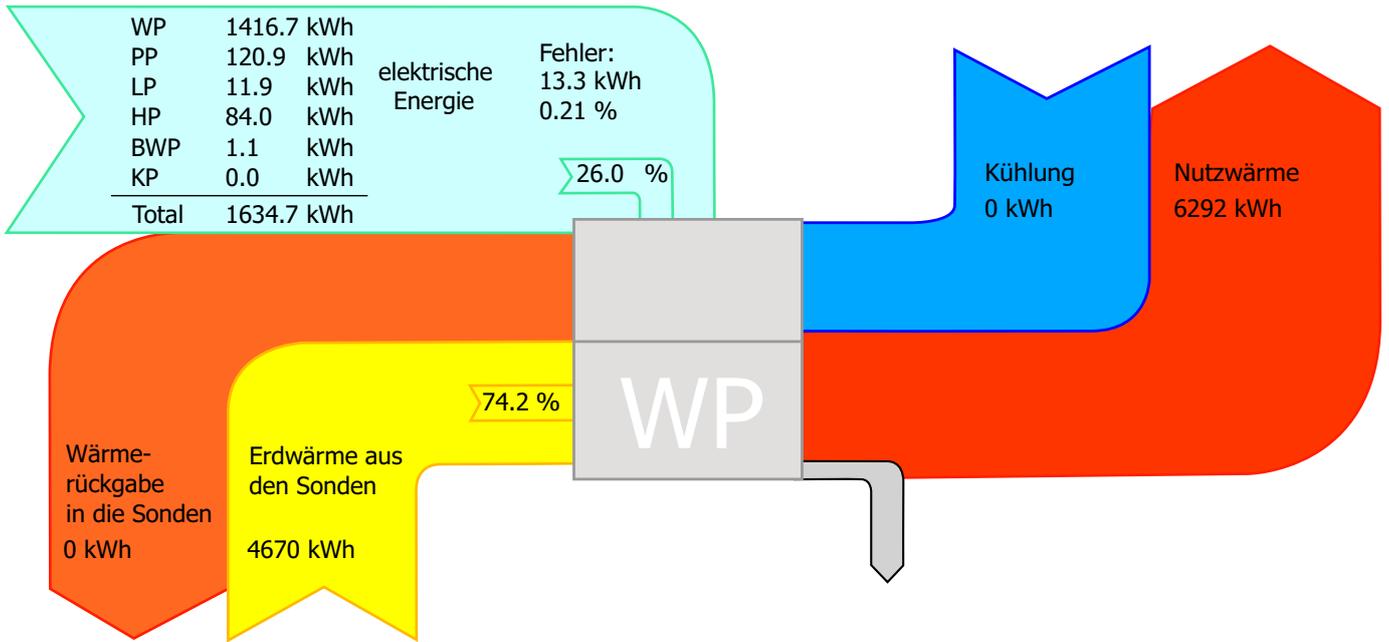
Ø	2.0 °C
MIN	-5.0 °C
MAX	9.2 °C

## Raumparameter

Temperatur	Luftfeuchtigkeit
Ø 22.6 °C	Ø 42.3%
Ø 23.1 °C	
Ø 22.3 °C	
Ø 24.5 °C	



Temperatur und Wärmebilanz im Februar 2011

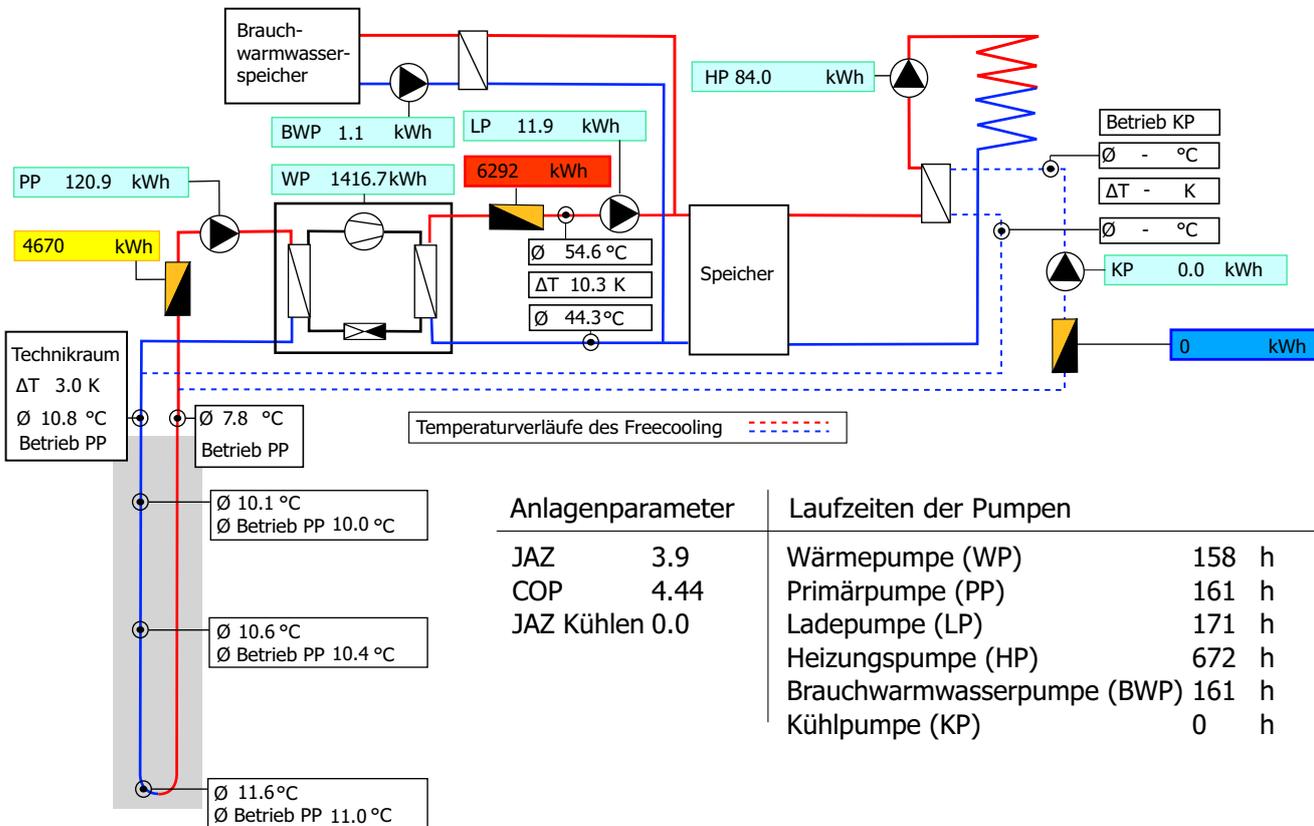


Ausstemperatur

Ø	3.1 °C
MIN	-3.9 °C
MAX	9.4 °C

Raumparameter

Temperaturen		Luftfeuchtigkeit
Ø	22.9 °C	Ø 41.6%
Ø	23.4 °C	
Ø	22.4 °C	
Ø	22.8 °C	



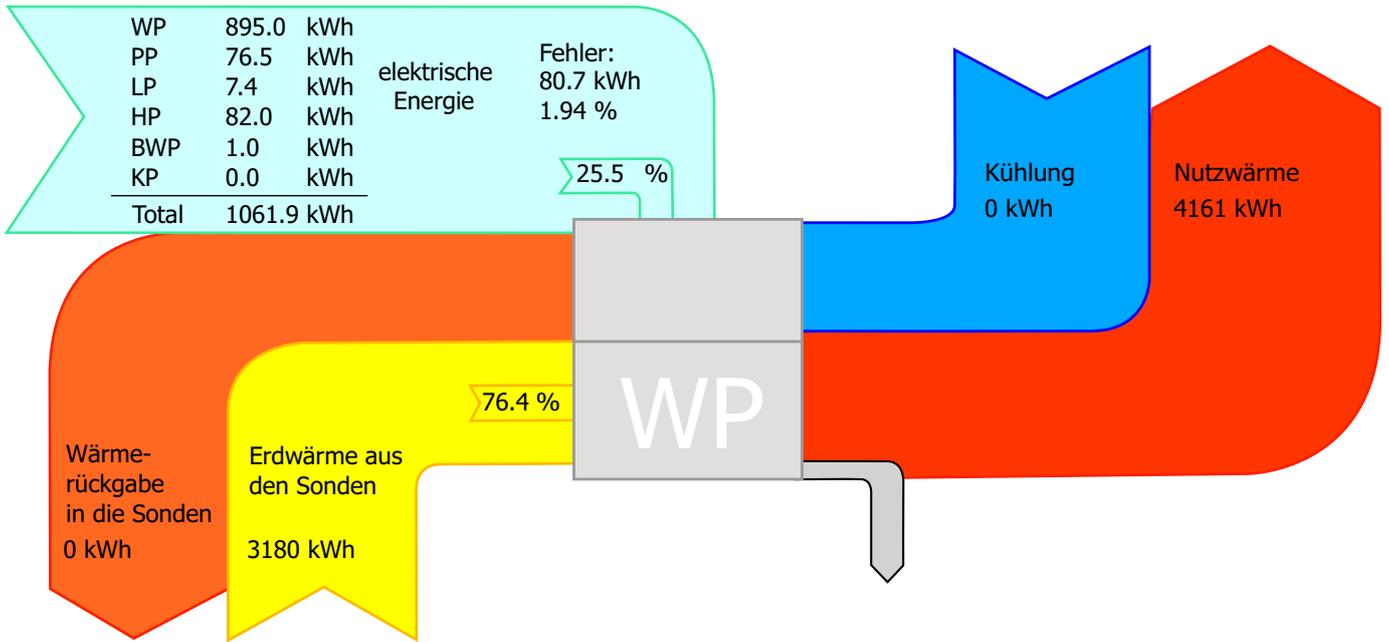
Anlagenparameter

JAZ	3.9
COP	4.44
JAZ Kühlen	0.0

Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	158 h
Primärpumpe (PP)	161 h
Ladepumpe (LP)	171 h
Heizungspumpe (HP)	672 h
Brauchwarmwasserpumpe (BWP)	161 h
Kühlpumpe (KP)	0 h

# Temperatur und Wärmebilanz im März 2011

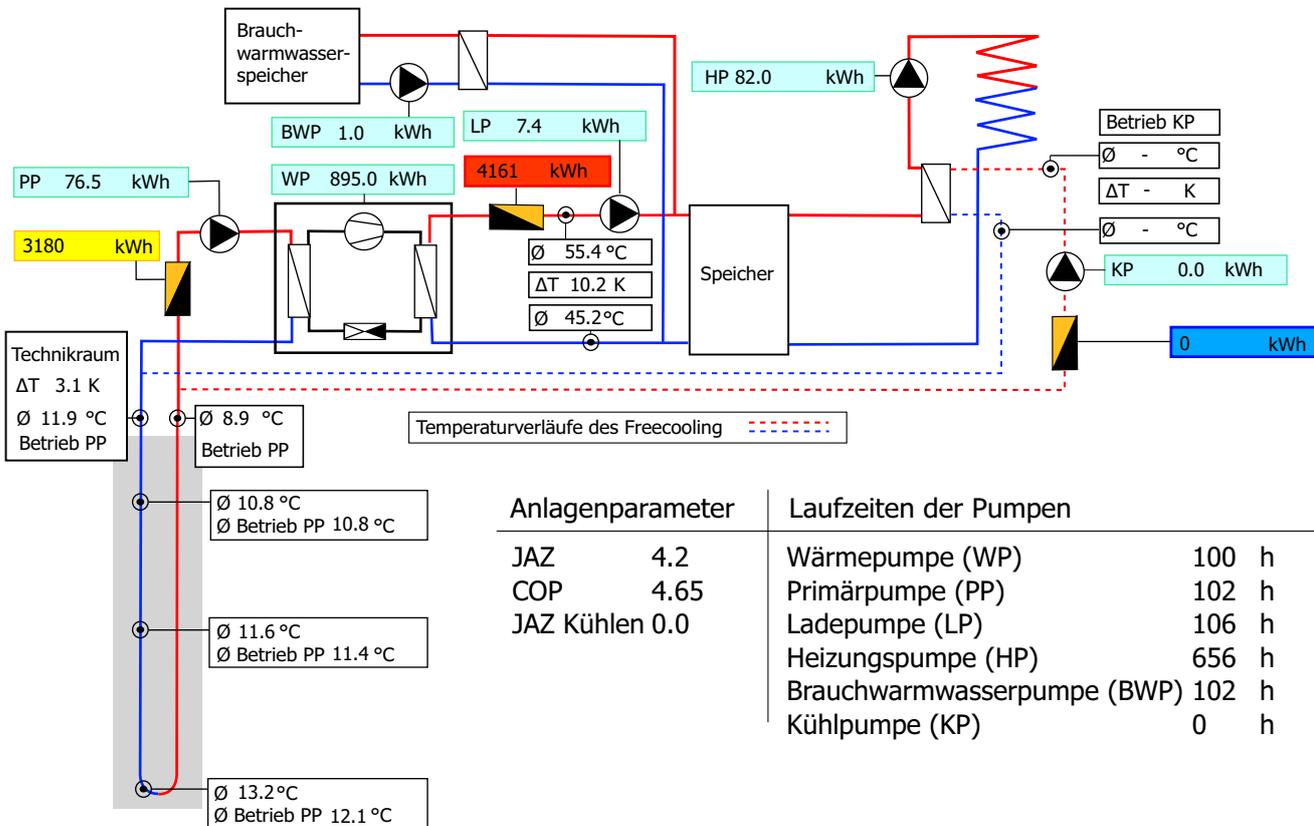


## Ausstemperatur

Ø	6.8 °C
MIN	-0.4 °C
MAX	15.8 °C

## Raumparameter

Temperaturen	Luftfeuchtigkeit
Ø 22.4 °C	Ø 42.0%
Ø 22.7 °C	
Ø 21.9 °C	
Ø 21.7 °C	



### Anlagenparameter

JAZ	4.2
COP	4.65
JAZ Kühlen	0.0

### Laufzeiten der Pumpen

Wärmepumpe (WP)	100 h
Primärpumpe (PP)	102 h
Ladepumpe (LP)	106 h
Heizungspumpe (HP)	656 h
Brauchwärmwasserpumpe (BWP)	102 h
Kühlpumpe (KP)	0 h

