



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 20. Januar 2014

Erfolgskontrolle – ZeroEmission-LowEx- Mehrfamilienhaus B35 Zürich

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Hochschule Luzern Technik & Architektur
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw

www.hslu.ch

Autoren:

Ullmann Lester, Hochschule Luzern, lester.ullmann@hslu.ch

Furter Rudolf, Hochschule Luzern, rudolf.furter@hslu.ch

De Neef Albert Tjeerd, Hochschule Luzern, tjeerd.deneef@hslu.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Rolf Moser

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500401 / SI/500401-02

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Einleitung	5
Grundlagen	6
Das Mehrfamilienhaus B35	6
Beschreibung der Wärme- und Kälteversorgungskonzepts	7
Zieldefinition des ZeroEmission-LowEx-Konzepts im Hinblick auf das B35	10
Das Messsystem.....	12
Methodik.....	14
Untersuchungsgegenstand.....	14
Datenprozessierung	15
Resultate	17
Energiebilanzierung des B35-Systems	17
Wärmepumpe und Fussbodenregister	20
Erdwärmesonden	21
Hybridkollektor	23
Untersuchung der Betriebsmodi für spezifische Perioden	24
Heizen – Kälteste Periode	24
Heizen – Kalte Periode.....	25
Warmwasser	28
Passive Kühlung	29
Regeneration	30
Vergleich mit Benchmarkwerten	31
Diskussion.....	33
Die Komplexität des B35 und die Datengrundlage	33
Diskussion zu den Resultaten	33
Wärmepumpe und Niedertemperatur-Heizsystem.....	34
Hybridkollektor	35
Erdwärmesonden	36
Schlüsselerkenntnisse.....	38
Literatur.....	39
Glossar.....	40
Anhang.....	41
Kalibration B35: Sensor T101 - T118.....	41
Kalibration B35: Sensor T129 - T144.....	42
Kanaltabelle B35.....	43
Messstellen.....	45
Wärmeenergiebilanz Quellenseite, Lastseite und Elektrische Energiebilanz	46

Zusammenfassung

Die Reduktion des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen von Gebäuden erfordern neue nachhaltige Lösungen. Ein möglicher Ansatz stellt das ZeroEmission-Low-Ex Konzept dar mit dem Ziel eines CO₂-freien Betriebs und der Minimierung des Exergiebedarfs. Die Umsetzung erfolgt mit Hilfe von aktiven Gebäudeelementen zur Lenkung und Speicherung der vorhandenen Energieströme.

Im Juni 2011 wurde das erste ZeroEmission-LowEx-Wohnhaus, das B35-Gebäude in Zürich, fertiggestellt. Die Energieversorgung wird mit der Wärme der Sonne und des Erdreichs sichergestellt. Zwei zwei-zonige Doppel-U-Rohrsonden mit einer Tiefe von 380/150m resp. 300/150m dienen in Winter als Wärmequelle für die Niederhub-Wärmepumpen. Im Sommer können mit Hilfe des Hybridkollektors und des Fussbodenregisters die überschüssige Wärme geerntet und in den saisonalen Erdspeicher eingelagert werden. Das Fussbodenregister ist somit einerseits ein Niedertemperatur-Heizsystem andererseits ein Erntesystem mit Kühlfunktion. Dezentrale Airboxen sind für die Luftversorgung zuständig und werden zusätzlich als Wärmequelle genutzt.

Für die Evaluation der Hauptenergieflüsse und des Betriebsverhaltens des Gebäudes wurde von der Hochschule Luzern ein Messsystem mit Pt100 Temperaturfühler und Mehrstrahl-Volumenmessteile installiert.

Das B35-Gebäude weist für die Untersuchungsperiode (Feb'12-Jan'13) einen Heizenergiebedarf von 82.4 kWh/m² a und einen Wärmebedarf für die Warmwasseraufbereitung von 8.1 kWh/m² a. Der Strombedarf der Wärmepumpen beläuft sich auf 13.6 kWh/m² a. Die Jahresarbeitszahl der Gesamtheit der Wärmepumpen beträgt 6.66, inkl. Warmwasseraufbereitung. Während der kältesten Periode im Februar 2012 betrug die Heizlastleistung 20.5 W/m² EBF bei einer Vorlauftemperatur von 28.3 °C. Mit einem elektrischen Bedarf der Wärmepumpen von 4W/m² EBF beläuft sich der COP für diese Periode auf 5.7.

Der Hybridkollektor lieferte 7373 kWh thermische und 3684 kWh elektrische Energie. Die Fussbodenregister kommen auf einen Wärmeertrag von 4863 kWh. Zusammen haben sie das Erdreich zu 28% regeneriert.

Die Erfahrungen und Ergebnisse haben aufgezeigt, dass die Hydraulik des Systems zu komplex aufgebaut ist und somit zu unerwünschten Effekten führt. Zudem konnten die zwei-zonigen Doppel-U-Rohrsonden nicht die gewünschten Temperaturen erzielen aufgrund von Wärmeverschmierungen zwischen den Gesteinsschichten. Auf die Wärmerückgewinnung der Abluft wurde schlussendlich verzichtet aufgrund insbesondere der kurzen Laufzeit und marginalen Energieerträgen. Insgesamt zeigen die Resultate, dass das Konzept im Grundsatz funktioniert und wegweisenden Charakter hat.

Einleitung

Der heutige Energieverbrauch und die verbundenen Treibhausgasemissionen belasten das Weltklima und die Prognosen verdeutlichen, dass nachhaltige Lösungen in allen Bereichen zwingend gefunden werden müssen. Die Problematik ist erkannt und wird mit dem international anerkannten 2-Grad-Ziel adressiert. Die Schweiz hat sich im Rahmen des Kyoto-Protokolls verpflichtet, den CO₂-Ausstoss um 8 % unter das Niveau von 1990 zu reduzieren. Mit einem breiten Instrumentarium unter anderem bestehend aus CO₂-Gesetz und Energiegesetz sollen diese Ziele umgesetzt werden (BAFU 2013).

Ein grosses Potential für die CO₂-Reduktion ist im Gebäudesektor auszumachen. Der Gebäudepark der Schweiz ist für mehr als 40% des gesamten Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen verantwortlich. Im per 1.1.2013 revidierten CO₂-Gesetz wird mit dem Gebäudeprogramm von Bund und Kantonen die energetische Sanierung von Gebäuden, die Investitionen in erneuerbare Energien, die Abwärmenutzung und die Optimierung der Gebäudetechnik gefördert (BAFU 2013).

Die gesetzlichen Bestimmungen für Neubauten und das bereits anerkannte Konzept Minergie zielen in die richtige Richtung, jedoch wird nur ein Teil der Gesamtproblematik berücksichtigt. Schlussendlich können weiterhin Technologien basierend auf fossilen Energieträger verwendet werden. Ein möglicher Ansatz für Neubauten sowie für die Sanierung der bestehenden Gebäude ist das Konzept von Hansjürg Leibundgut mit dem Namen „ZeroEmission-LowEx-Architecture“. Es umfasst eine ganzheitliche Betrachtung der Gesamtproblematik in Hinblick auf mögliche Optionen zur Reduktion des Energieverbrauchs sowie der CO₂-Emissionen. In Zukunft ist unabdingbar, dass die Gebäude ohne fossile Brennstoffe und mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Die auf ein Gebäude einfallende Solarenergie kann durchaus höher sein als die benötigte Energie für die Sicherstellung des Komforts im Gebäude. Für die Erschliessung dieser Ressource sind neue Technologien zur Lenkung und Speicherung dieser Energieströme erforderlich. Am Institut für Gebäudetechnik an der ETH Zürich ist dieser Ansatz weiterentwickelt und schlussendlich unter anderem mit dem Neubau B35 zum ersten Mal umgesetzt worden. Das Wohnhaus B35 hat durch die erstmalige Anwendung einer Vielzahl neuer Technologien im täglichen Betrieb einen Experimentalcharakter und zugleich eine Vorzeigefunktion. Es repräsentiert somit einen wichtigen Meilenstein in der weiteren Entwicklung des ZeroEmission-LowEx-Konzepts.

Projektziele

Mit dem Mehrfamilienhaus B35 und dem zugrunde liegenden ZeroEmission-LowEx-Konzept soll aufgezeigt werden, dass mit heutigen marktfähigen Technologien ein Gebäude mit erneuerbaren Energien und CO₂-neutral betrieben werden kann. Im Rahmen dieses P&D-Projekts wird eine Validierung des B35-Projekts anhand einer Jahresenergiebilanzierung durchgeführt. Dies beinhaltet die Wiedergabe der Energiekennzahlen bezüglich thermischen und elektrischen Verbrauchs des Gebäudes. Das Augenmerk wird des Weiteren auf die Leistungsfähigkeit und das Betriebsverhalten der Hauptkomponenten im Betrieb sowie deren Interaktion gelegt. Von besonderem Interesse sind die Ergebnisse bezüglich der unterschiedlich tiefen Erdwärmesonden im Heizfall und bei der Regeneration durch den Hybridkollektor und die Fussbodenregister (passive Kühlung). Ferner interessieren die Resultate des neuartigen Hybridkollektors, welcher nebst elektrischer auch thermische Energie liefert.

Grundlagen

Das Mehrfamilienhaus B35¹

Das B35-Gebäude an der Bolleystrasse 35 in Zürich repräsentiert das erste Wohngebäude der Schweiz, welches auf der Basis des ZeroEmission-LowEx-Konzepts erstellt worden ist (siehe Abb. 1). Das Wohnhaus wurde im Juli 2011 fertiggestellt und beinhaltet vier moderne Wohnungen und eine Bürofläche im Erdgeschoss. Eine architektonische Besonderheit stellt



Abb. 1: Das Mehrfamilienhaus B35 in Zürich

das teilweise integrierte, ehemalige Wasserreservoir dar, das als Ausstellungsraum für die eingebauten Technologien verwendet wurde. Im Spätsommer 2012 wurde für die Erweiterung der Bürofläche mit dem Umbau des Reservoirs begonnen und Ende September fertiggestellt. Durch den Umbau erhöht sich die Energiebezugsfläche von 683m² auf 899m². Das B35-Gebäude weist nach SIA 380/1 einen spezifischen Heizungsbedarf von 53 kWh/m²a und einen Wärmebedarf für Warmwasser von 17 kWh/m²a auf. Durch den Umbau des Reservoirs muss ab Oktober 2012 mit einem höheren Bedarf gerechnet werden.

Mit dem B35 wird ein neuer Weg zur Bereitstellung des Energiebedarfs beschritten. Für die Erreichung der Ziele einer rein erneuerbaren Energieversorgung und der damit einhergehenden Reduktion der CO₂-Emissionen sind über zehn neue Technologien integriert worden. Mit verschiedenen Technologien, den sogenannten Erntesystemen, wird die überschüssige Solarwärme im Sommer in einen saisonalen Wärmespeicher eingelagert und in den Winter überführt. Zur Beheizung des Gebäudes und zur Warmwasseraufbereitung wird die eingespeicherte Wärme bei Bedarf wieder dem Speicher entzogen (siehe Abb. 2). Das B35-Gebäude weist einen Experimentalcharakter auf und muss als Forschungslabor gesehen werden, an welchem die konzeptionellen Überlegungen erprobt werden.

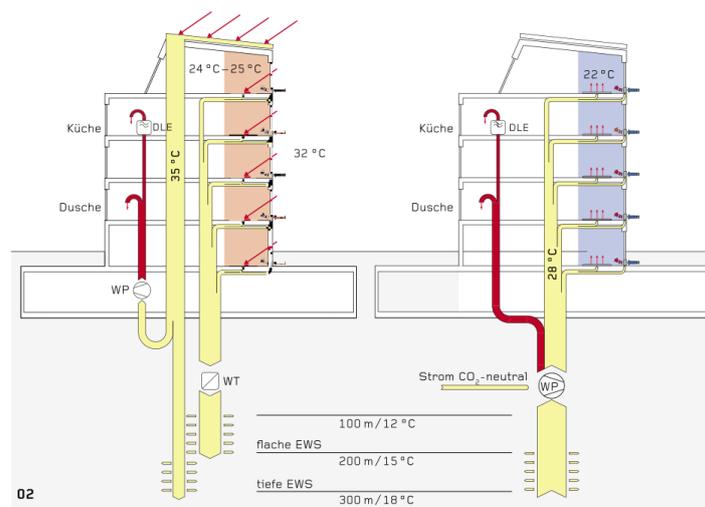
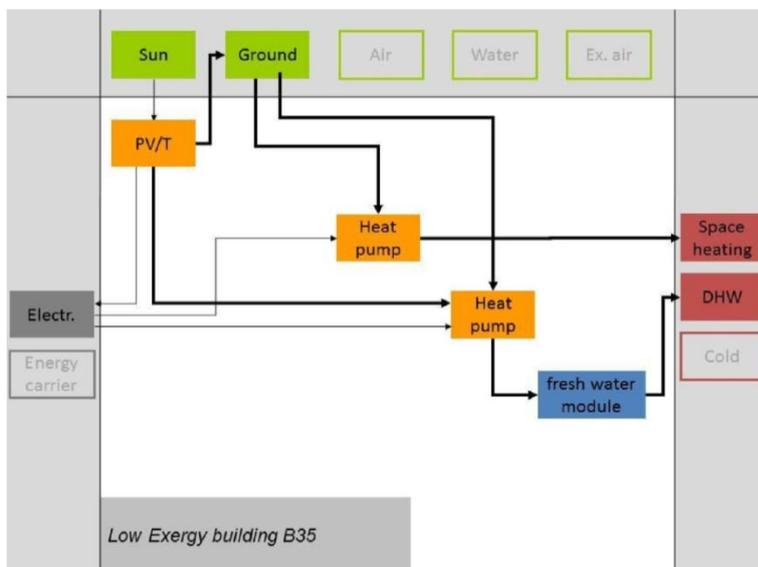


Abb. 2: Laden und Entladen des Erdspeichers

¹ Die Informationen in diesem Kapitel sind aus dem Buch „LowEx Building Design“ von H. Leibundgut

Beschreibung des Wärme- und Kälteversorgungskonzepts

Das Herzstück des B35-Wärmerversorgungssystems sind drei erdgekoppelte **Niederhub-Wärmepumpen** mit einer Heizleistung von je 9.68 kW bei einem elektrischen Leistungsbezug von 1.16 kW. Eine Wärmepumpe wird für die Warmwasseraufbereitung verwendet, zwei Wärmepumpen werden für die Bereitstellung der Heizenergie benötigt. Als Quelle dient entweder der saisonale Erdwärmespeicher, das Hybridkollektorfeld oder die Kombination dieser zwei Quellen (siehe Abb. 3). Beim **Erdwärmespeicher** handelt es sich um eine neue Bauart einer Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonde. Der Speicher wird über zwei Bohrlöcher mit einer Tiefe von 380m respektive 300m und einem Abstand von 15m erschlossen. Pro Bohrloch wird jeweils ein langes U-Rohr (380/300m) und ein kurzes U-Rohr (150m) abgeteufelt. Die langen U-Rohre sind jeweils in den ersten 150m mit einer 4mm



starken Isolationsschicht ausgestattet (siehe Abb. 4 links). Somit ergeben sich für das B35 vier einzeln bewirtschaftbare Erdspeicher. Die natürliche Erdreichtemperatur liegt zwischen 9-15 °C bzw. 15-22.5 °C (siehe Abb. 4 rechts). Das Ziel ist die Wärmepumpe mit möglichst hohen Temperaturen zu versorgen. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass eine Zieltemperatur von 15 °C angestrebt wurde, damit der COP der Wärmepumpe höher als sieben ist.

Abb. 3: Konzeptschema des B35

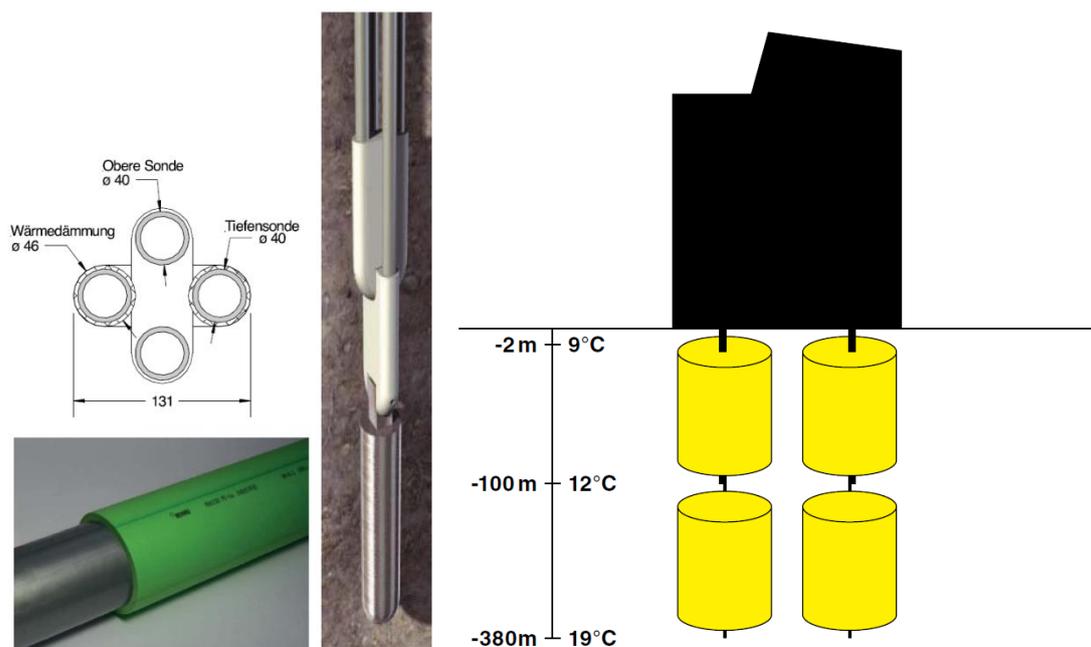


Abb. 4: Links: Zwei-Zonige Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonde. Rechts: Wärmespeicherung im Erdreich

Auf dem Dach des B35 befinden sich zwei Flächen mit einer Neigung von 10° , ausgerichtet gegen Südwesten, von denen eines mit 18 neuartigen **Hybridkollektoren** mit einer Gesamtfläche von rund 29 m^2 ausgestattet worden ist. Der Hybridkollektor repräsentiert eines der solaren Erntesysteme. Es handelt sich um ein monokristallines Photovoltaik-Panel, das an der Rückseite mit einem thermischen Absorber aus Aluminium versehen worden ist (siehe Abb. 5). Der Hybridkollektorkreislauf wird mit einer 34%-Glykol-Mischung betrieben ($c_p = 3.65 \text{ kJ/kgK}$). Der Hybridkollektor hat eine elektrische Peakleistung von 150 W/m^2 , was für die gesamte Fläche in einer Jahresproduktion von rund $4'100 \text{ kWh}$ resultieren dürfte. Der Jahreswärmeertrag wurde auf rund $14'000 \text{ kWh}$ geschätzt. Es wurde angenommen, dass mit Temperaturen von durchschnittlich $25 \text{ }^\circ\text{C}$ gerechnet werden können. Die erreichte Temperatur verhält sich reziprok zur thermischen Leistung und ist zum Teil an die Betriebseinstellungen geknüpft. Bei der Berechnung handelt es sich um eine Schätzung basierend auf Kurzmessungen, welche am Institut für Solartechnik in Rapperswil durchgeführt worden sind. Mit dem Hybridkollektor können die tiefen Zonen der Erdwärmesonden regeneriert werden oder er kann als Quelle für die Wärmepumpen genutzt werden.



Abb. 5: Der Hybridkollektor

Ein weiteres wichtiges Element ist das **Niedertemperatur-Fussbodenregister**, welches im Heizfall mit einer Temperatur zwischen 28 und $30 \text{ }^\circ\text{C}$ betrieben wird. Folglich sind grosse Austauschflächen für die Wärmeübertragung notwendig. Im B35 sind 76 verschiedene Heizkreise mit unterschiedlichen Rohrlängen eingebaut worden. Aufgrund der erschwerten Bedingungen für den hydraulischen Ausgleich sind die Heizkreisventile im Heizverteiler mit Kleinpumpen ausgestattet worden. Die Fussbodenheizung agiert jedoch nicht nur als Wärmesenke. Im Sommer nimmt das Fussbodenregister und die TABS-Register die



Abb. 6: Einbau der Airbox in die Installationsbox

Funktion einer Erntemaschine ein und dient als Wärmequelle für die Regeneration der kurzen Erdwärmesonden. An dieser Stelle wird kurz festgehalten, dass neben der Fussbodenheizung zwei weitere Systeme mit ähnlicher Funktion installiert worden sind. Es handelt sich zum einen um die TABS-Register (Thermo-Aktives-Bauteil-System), ein ergänzendes Raumheizungs- bzw. Kühlungssystem. Zum anderen ist von der neuentwickelten **Airbox** die Rede (siehe Abb. 6). Die Airbox ist ein Zuluftgerät mit eingebautem Lamellen-Wärmetauscher für die Erwärmung bzw. Kühlung der Aussenluft. Der Wärmetauscher ist an das gleiche hydraulische System wie die Fussbodenregister und TABS-Register angeschlossen. Die Abluft wird an vier Punkten der Wohnungen abgesaugt und für die

Wärmerückgewinnung über Vertikalschächte zu den Plattenwärmetauchern auf dem Dach geleitet.

Die drei Erntesysteme sind durch die Wärmepumpen und einen Plattenwärmetaucher vom hydraulischen System der Erdwärmesonden und des Hybridkollektors getrennt. In der Abbildung 7 (links) ist der Heizraum mit den Wärmepumpe und der lastseitigen Hydraulik zu sehen. Abbildung 7 (rechts) zeigt die Hydraulik in der Garage bei den Erdwärmesonden. Durch Plattenwärmetauscher sind fast alle Komponenten des Systems mit einander verknüpft und ermöglichen so die Wärmeübertragung. Die Hydraulik im B35 weist Experimentalcharakter auf.



Abb. 7: Links: Heizzentrale. Rechts: Hydraulik bei den EWS

Für die Warmwasseraufbereitung im B35 wird das Durchflussverfahren angewendet (siehe

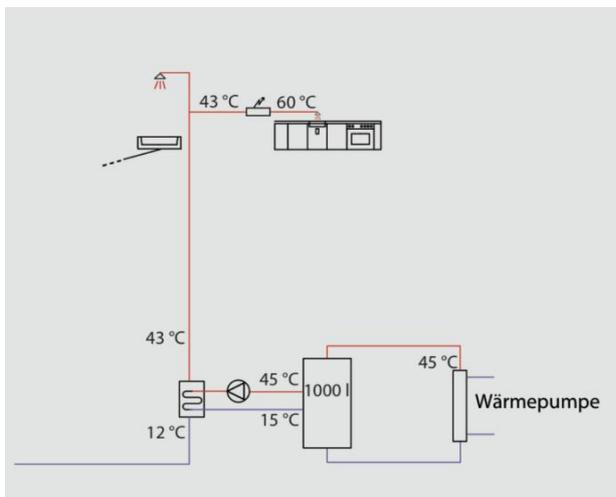


Abb. 8: Schaltschema Wasseraufbereitung

Abb. 8). In einem Warmwasserspeicher mit 1000l Fassungsvermögen wird das Heizwasser, das mit der Wärmepumpe von 15 °C auf 45 °C erhitzt wird, gespeichert. Mit Hilfe eines Plattenwärmetauschers wird das rund 12 °C kalte Frischwasser auf die Verbrauchertemperatur von 43 °C erwärmt. In einem elektrischen Durchlauferhitzer kann das Frischwasser zudem bei Bedarf in der Küche auf 60 °C erhitzt werden (siehe Abb. 8). Diese Variante der Warmwasseraufbereitung liegt im Sinne des ZE-LowEx-Konzepts, da die Verwendung von Niederhub-Wärmepumpen ermöglicht wird.

Das Gebäude ist mit einem **neuartigen Automatisierungssystem** ausgestattet. Sämtliche gebäudetechnischen Installationen wie z.B. die Umwälzpumpen, Ventile oder die Markisen werden mit Digitalstrom versorgt und können mit der Mivune-Software gesteuert werden. Digitalstrom ist ein Powerline-System und ermöglicht die Übertragung von Informationen über das 230-Volt-Stromnetz, indem ein Chip vor die zu steuernden Stromverbraucher montiert wird. Neben den Digitalstrom-Signalen werden Funksignale (EnOcean) mit weiteren Informationen wie Raumtemperatur für die RBC-Steuerung (Rule Based Control) benötigt. In der Gebäudesteuerung ist die Topologie der Betriebsmodi definiert. Grundsätzlich sind sechs übergeordnete Betriebsmodi definiert: Heating, Warmwasser, Changeover, Cooling, Warmwasser, Testen. Den Betriebsmodi sind die implementierten Akkorde untergeordnet, welche schlussendlich die spezifischen Betriebseinstellungen definieren. Eine detaillierte

Beschreibung der Gebäudesteuerung ist nicht Teil dieses Berichts. Einige Aspekte sollen jedoch für das Verständnis hervorgehoben werden:

- Verschiedene Akkorde können parallel betrieben werden.
- Es gibt drei Heizakkorde je nach Höhe der Last (definiert die Anzahl aktivierter WP's)
- Die Warmwasseraufbereitung kann einerseits aus dem Heizmodus, andererseits aus dem Kühlmodus gestartet werden. Je nachdem werden die kurzen oder die langen Erdwärmesonden als Quellen genutzt. Der Hybridkollektor kann bei Erreichung der Stellgröße in einer ersten Stufe hinzugeschaltet werden und in einer zweiten Stufe als einzige Quelle verwendet werden.

Zieldefinition des ZeroEmission-LowEx-Konzepts im Hinblick auf das B35

Mit der Reiseroute „viaggiata“ wurde ein Weg beschritten mit dem Ziel, eine nachhaltige Lösung für den Schweizer Gebäudepark (Emissionsfreiheit im Betrieb) aufzuzeigen. Auf diesem Weg ist das ZeroEmission -LowEx-Konzept entstanden und mit ihm verschiedene Technologien wie z.B. der Hybridkollektor. Das ZeroEmission -LowEx-Konzept definiert auf der Basis von thermodynamischem und physikalischem Wissen die Voraussetzungen, die für die Erreichung der Ziele gegeben sein müssen. Mit den getätigten Erfahrungen haben sich im Verlaufe des Projekts auch die Zieldefinitionen dynamisch angepasst. Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht im Detail auf das ZeroEmission -LowEx-Konzept eingegangen. Für weitere Informationen wird auf die Internetseite „www.viaggiata.org“ und auf das Buch „LowEx Building Design“ verwiesen.

Das B35-Gebäude ist ein Etappenschritt auf dem Weg zur Komplettierung des Konzepts. Das Hauptziel, welches mit dem B35 erreicht werden soll, ist zu beweisen, dass der vorgeschlagene Weg machbar und auch zielführend ist. In diesem Sinne wurde bei der Planung des B35 keine spezifische Zieldefinition respektive Zielwerte, sondern eher ein Energiekonzept entwickelt basierend auf den Annahmen zu den neuentwickelten Komponenten. Die Auslegung ist in Abbildung 9 dargestellt.

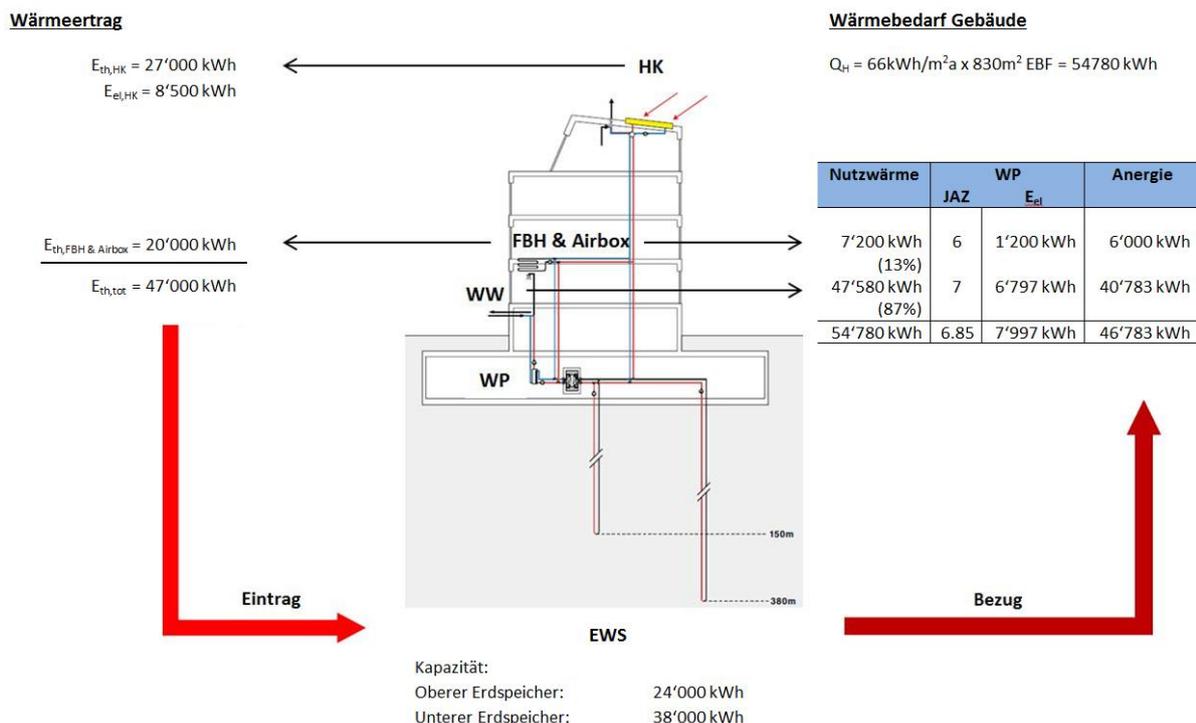


Abb. 9: Schema zum Energiekonzept des B35 (Für Abkürzungen siehe Glossar, Seite 39)

Bei der Planung des Konzepts wurde von einem spezifischen Heizungsbedarf inklusive Warmwasser von 66 kWh/m²a ausgegangen. Bei der ursprünglich in der Planung definierten Energiebezugsfläche von 830m² ergibt dies 54'780 kWh. Für die Warmwasseraufbereitung wurde von einem Wärmebedarf von 7'200 kWh ausgegangen. Somit bleibt für die Raumwärme 47'580 kWh. Wird von einer Jahresarbeitszahl von sechs für die Warmwasseraufbereitung und von sieben für die Raumwärme ausgegangen, ergibt dies einen Energiebedarf von 6'000 kWh für Brauchwasserrespektive 40'783 kWh für den Heizbedarf. Der elektrische Energiebedarf summiert sich auf 7'997 kWh (9.6 kWh/m² EBF). In der Gesamtbetrachtung ergibt sich somit eine Jahres-arbeitszahl von 6.85. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die grundsätzliche Zielsetzung des ZeroEmission-LowEx-Konzepts eine Jahresarbeitszahl von sechs definiert. Das Energie-konzept beinhaltet zudem, dass der Energiebedarf durch die Erntemaschinen gedeckt werden kann. Wird von einer Hybridkollektorfläche von 60m² ausgegangen, beträgt der elektrische Energieertrag 8'500 kWh. Der Wärmeertrag beläuft sich auf rund 27'000 kWh bei durchschnittlich 25 °C. Für die Fussbodenregister und die Airboxen wird von einem Wärmeertrag von rund 20'000 kWh bei 22 °C ausgegangen, was schlussendlich in einem totalen Wärmeertrag von rund 47'000 kWh resultiert. Die Deckung wird demnach erreicht und das Erdreich, welches als saisonaler Wärmespeicher fungiert, hat bei der geplanten Länge der Erdwärmesonden genügend Wärmekapazität für die Bereitstellung und Speicherung der Wärmeenergie.

Das Messsystem

Das von der Hochschule Luzern installierte Messsystem dient der Erfassung der Temperaturen und der Massenströme an verschiedenen zentralen Messpunkten im hydraulischen System. Basierend auf den Messwerten können die Energieströme berechnet werden. Für die Messdatenerfassung wurde eine SAIA SPS Steuerung verwendet. Abbildung 10 bietet einen Überblick zum Aufbau des Messsystem. Die Master-Messstation mit dem Hauptcontroller SAIA_PCD3.M2330A4T5_WAC wurde im Technikraum (Keller) installiert. Eine weitere Messstation (Slave) auf dem Dach für die Hybridkollektoren und die Abluftkühler ist via einer TCP/IP-Verbindung mit der Masterstation verbunden. Weitere PCD's (Process Control Device) dienen schlussendlich der effektiven Datenerfassung. Die Daten werden im Minutenintervall gemessen und ca. alle vier Tage in einem CSV-File auf der eingebauten SD Speicherkarte gespeichert. Für die Kommunikation mit dem Hauptcontroller bestehen zwei Möglichkeiten. Zur Fernauslesung der geloggeten Daten ist der Hauptcontroller via DSL Internet Modem/Router mit dem Internet verbunden. Zudem verfügt die SAIA Steuerung über eine GPRS-Backup-Datenverbindung für Datenübertragung, Alarming und Remote-Troubleshooting.

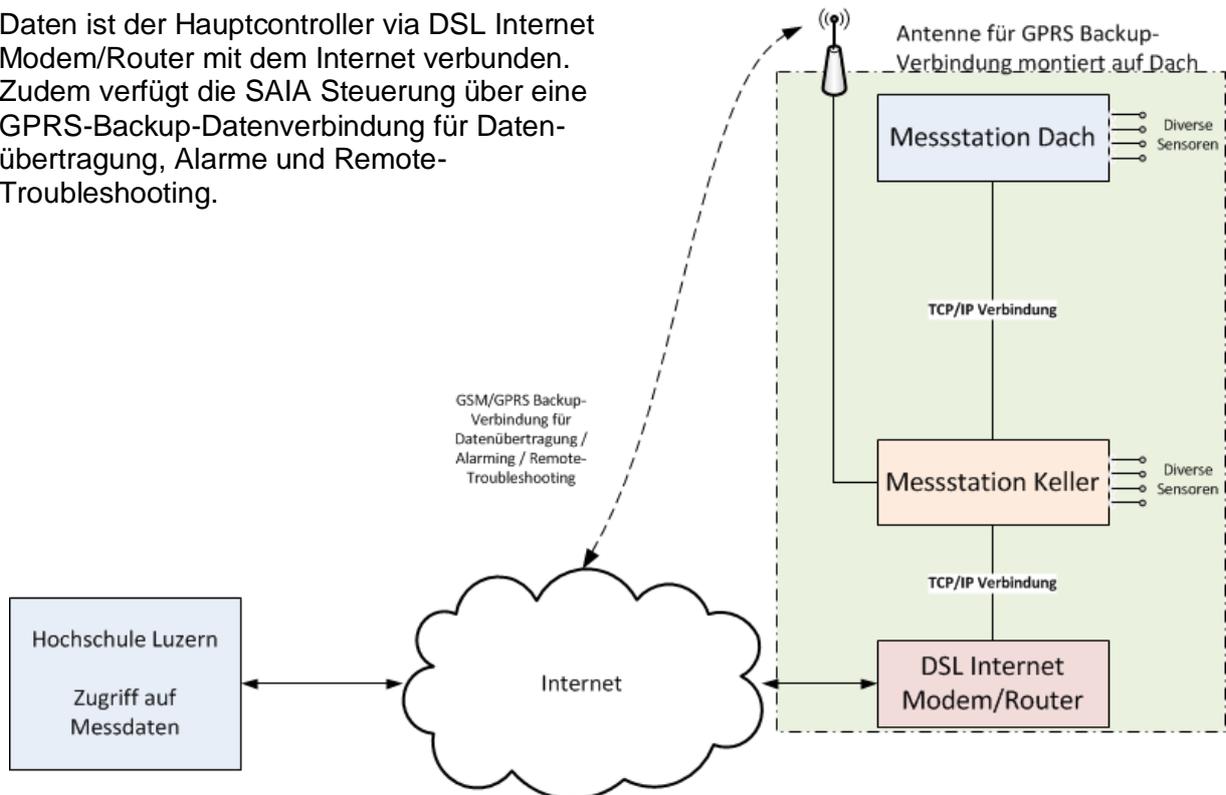


Abb. 10: Aufbau des Messsystems der Hochschule Luzern im B35

Im B35-Gebäude wurden insgesamt elf Durchflussmesser (Mehrstrahlzähler) mit den dazugehörigen Temperatursensoren eingebaut. Grundsätzlich werden die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie der Massenstrom bei folgenden Komponenten gemessen:

- Erdwärmesonden (pro Speicherzone des Erdreichs, d.h. 4x)
- Hybridkollektor
- Abluft Wärmerückgewinnung
- Wärmepumpen quellenseitig
- Fussbodenheizung
- Warmwasserspeicher

Die Positionen der Messeinrichtungen zur Bestimmung der Energieströme sind in der Abbildung 11 dargestellt. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass der Temperatursensor

für den Rücklauf der Fussbodenheizung vom Installateur nicht an der richtigen Stelle installiert worden ist. Für die Verteilung der Raumwärme im Gebäude wird das Hauptrohr in der Heizzentrale in zwei Stränge aufgeteilt, wobei ein Strang die Nordseite und der andere die Südseite des Gebäudes versorgt. Es wurde im Nachhinein festgestellt, dass der Temperatursensor im Rücklauf der Nordseite anstatt im Hauptrohr installiert wurde.

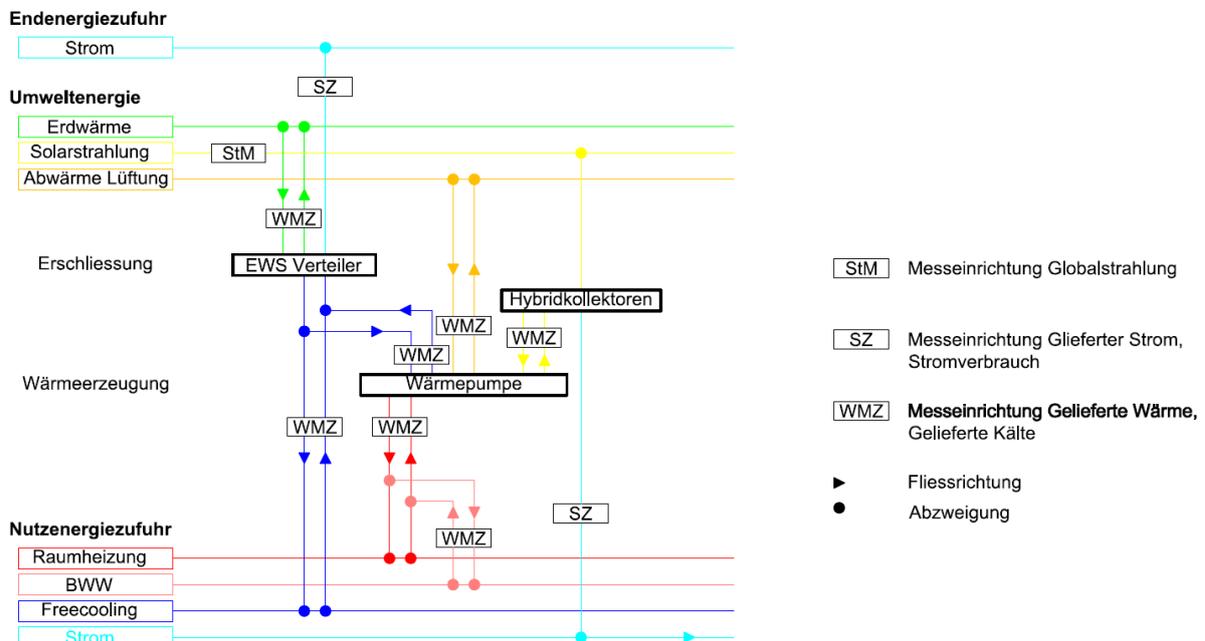


Abb. 11: Messkonzept (HSLU 2012)

Bei den Temperatursensoren handelt es sich um Pt100 Temperaturfühler. Die Temperatursensoren wurden vorgängig kalibriert (siehe Anhang). Die Massenstrommessung wird mit Mehrstrahl-Volumenmessteilen mit Impulsgebern durchgeführt. Die Messdatenerfassung erfasst die Impulse mit einer Auflösung von 2.5 ltr/Imp. Des Weiteren werden die Umgebungsparameter „Aussentemperatur und Solarstrahlung“ sowie Kollektortemperaturen an sieben Stellen entlang einer Serieschaltung aufgezeichnet. Für die Messung der Solarstrahlung wurde ein Silizium-Pyranometer (Haenni SOLAR 130) verwendet.

Strommessung

Durch die ewz werden die Leistungsbezüge der drei Wärmepumpen, die Leistungsbezüge eines allgemeinen Stromzählers sowie die elektrischen Leistungsabgaben des Hybridkollektorfeldes gemessen. Die Messdaten werden im 15-Minuten-Intervall aufgezeichnet. Der allgemeine Stromzähler umfasst diverse Lasten im Gebäude. Neben den Umwälzpumpen des quellenseitigen Wärmeversorgungssystems sowie den lastseitigen Umwälzpumpen der Wärmepumpen und der passiven Kühlung werden zudem die Messanlagen, die Treppenhausbeleuchtung, der Personenlift, die Rohrbegleitheizung und noch einige mehr in diesem Messpunkt vereint. Für die Strombezüge der Verbraucher im Gebäude sind keine Daten verfügbar.

Methodik

Für die Energieanalyse des B35-Wärmeversorgungssystems stehen in erster Linie die Messdaten der Hochschule Luzern zur Verfügung. Anhand der Temperatur- und Massenstrommessungen können die Wärmeströme berechnet werden. Des Weiteren können die Messdaten der elektrischen Leistungsbezügen bzw. -abgaben miteinbezogen werden, welche zur Berechnung des COP's verwendet werden.

Ursprünglich sollte eine Anwohnerbefragung zur Analyse hinzugezogen werden. Aufgrund der wechselnden Belegung des Gebäudes sowie den Beobachtungen durch den Bauherrn wurde darauf verzichtet.

Im nächsten Abschnitt wird der Untersuchungsgegenstand beschrieben, gefolgt von Erläuterungen zur Datenprozessierung.

Untersuchungsgegenstand

Anhand der Messdaten wird in einem ersten Teil eine Jahresenergiebilanzierung des Gesamtsystems und den einzelnen Hauptkomponenten durchgeführt. Die Wärmeenergiebilanz der Quellenseite basiert auf folgender Gleichung:

$$E_{EWS,out} + E_{EWS,in} + E_{FBH,Kühlen} + E_{HK,out} + E_{WP,in} = \Delta E \quad (1)$$

Idealerweise sollte die Energiebilanz für das ΔE null ergeben. Aufgrund der Datenlage wurde der Zeitraum vom Februar 2012 bis Januar 2013 gewählt. Dieser Teil der Analyse fokussiert in erster Linie auf die Energie pro Energiebezugsfläche im System und veranschaulicht den Energiebedarf des Wärmeversorgungssystems. Zudem werden die Energieerträge der Energiequellen präsentiert. Das Hauptinteresse liegt in folgenden Energiekennzahlen:

- Heizenergiebedarf $E_{th,FBH}$
- Energiebedarf für die Warmwasseraufbereitung $E_{th,WW}$
- Elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen $E_{el,WPs}$
- Thermische Energie der Komponenten:
 - Erdwärmesonden $E_{th,EWS}$
 - Hybridkollektor $E_{th,HK}$
 - Fussbodenregister als Anergiequelle $E_{th,FBH}$
- Elektrischer Energieertrag des Hybridkollektors $E_{el,HK}$
- Arbeitszahl: monatliche Arbeitszahl AZ_{WP} und Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen JAZ_{WP} (ohne Umwälzpumpen)

Aufgrund der Komplexität des hydraulischen Systems, der zahlreichen Möglichkeiten verschiedener Akkorde sowie das Fehlen verschiedener Messpunkte im System mussten einige Annahmen und Vereinfachungen bei der Analyse getätigt werden. Die wichtigsten Annahmen sind im Folgenden aufgelistet:

- Die Verluste im hydraulischen System bei der Wärmeübertragung zwischen den Komponenten werden vernachlässigt. Dieser Aspekt wird nochmals qualitativ bei der Diskussion beurteilt.

- Der Hybridkollektor und das Fussbodenregister (Fall passive Kühlung) sind mittels Plattenwärmetauscher an das restliche hydraulische System angeschlossen. Aufgrund fehlender Messwerte können keine Aussagen hinsichtlich der Wärmeübertragung über die Plattenwärmetauscher gemacht werden. Folglich muss die Wärmeübertragung als ideal angenommen werden.
- Die drei Wärmepumpen müssen bei gewissen Untersuchungsgegenständen als eine einzelne Wärmepumpe betrachtet werden (z.B. COP-Berechnung).

In einem zweiten Teil werden die übergeordneten Betriebsmodi „Heizen, Warmwasser, Passive Kühlung und Regeneration“ genauer betrachtet. Anhand spezifisch ausgewählter Zeitabschnitte wird das Betriebsverhalten aufgezeigt. Hinsichtlich des Betriebsmodus Heizen werden zwei Perioden untersucht: die kälteste Zeit im Jahr sowie eine „normal“ kalte Periode. Für die weiteren Betriebsmodi wurden geeignete Zeitabschnitte ausgewählt, bei denen die Betriebseigenschaften des jeweiligen Modus mehr oder weniger isoliert hervorgehoben werden können. Wie bereits erwähnt, können mehrere Betriebsakkorde parallel laufen. Folgende Perioden werden bei der Untersuchung betrachtet:

- Heizen - kälteste Periode: 07.02.12 – 14.02.12
- Heizen - kalte Periode: 12.11.12 – 18.11.12
- Warmwasser: 10.07.12 – 12.07.12
- Kühlen: 19.08.12 – 23.08.12
- Regeneration und HK Ertrag 15.06.12 – 19.06.12

Im zweiten Teil wird vor allem auf die Belastung respektive die Leistung pro Energiebezugsfläche der relevanten Komponenten fokussiert. Zudem sind die erreichten Temperaturen von Interesse.

Datenprozessierung

Die Auswertung der HSLU-Messdaten wurde unter der Verwendung von MATLAB durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden vorhandene Datenlücken identifiziert. Neben grösseren Datenlücken aufgrund von Systemausfällen sind zudem kleinere Datenlücken im Minutenbereich ausgemacht worden. Diese Datenlücken sind hauptsächlich auf den täglichen Neustart der Master-Messstation zurückzuführen. Der Neustart wurde eingeführt, damit bei einem Systemabsturz der Ausfall der Messdatenerfassung minimiert wird. Die kleineren Datenlücken wurden mit Hilfe einer Interpolationsfunktion geschlossen. Grössere Datenlücken wurden für folgende Zeitperioden ausgemacht:

- Februar: 01.02.2012 00:00 bis 06.02.2012 13:07
- März: 24.03.2012 11:00 bis 28.03.2012 15:59
- Mai: 04.05.2012 09:00 bis 05.05.2012 04:59
14.05.2012 10:50 bis 15.05.2012 04:16
- Juni: 29.06.2012 15:05 bis 30.06.2012 04:13

Es hat sich gezeigt, dass zur Schliessung der Datenlücken die Duplikation ähnlicher Perioden mit vorhandenen Daten am sinnvollsten erscheint. Für dieses Vorgehen wurden die Aussentemperatur der HSLU-Messung mit den Messungen von MeteoSchweiz für die Wetterstation „Zürich Fluntern“ verglichen. Für die oben definierten Perioden wurden folgende Abschnitte gewählt:

- Februar: 07.02.2012 00:00 bis 12.02.2012 13:07
- März: 19.03.2012 11:00 bis 23.03.2012 15:59
- Mai: 03.05.2012 09:00 bis 04.05.2012 04:59
13.05.2012 10:50 bis 15.05.2012 04:16
- Juni: 28.06.2012 15:05 bis 29.06.2012 04:13

In einem nächsten Schritt werden die Wärmeströme für die verschiedenen Komponenten berechnet basierend auf der folgenden Gleichung:

$$Q = m \times c_p \times \Delta T \quad (2)$$

Q: Wärmestrom
 m: Massenstrom
 c_p: Spezifische Wärmekapazität
 ΔT: Temperaturspreizung

In einem letzten Schritt wird die Mittelwertbildung unter Berücksichtigung der Richtung des Wärmestroms vorgenommen. Die Unterteilung ist notwendig damit Aussagen über die Regeneration sowie über das Passive Kühlen gemacht werden können. Die Daten werden auf 15-Minuten-Zeitschritte für die detaillierte Untersuchung der Betriebsmodi und auf Stunden-Zeitschritte für die Jahresanalyse gemittelt. Bezüglich der Richtung des Wärmestroms wird folgende Konvention verwendet:

- Q > 0 Wärme fliesst aus dem System
- Q < 0 Wärme fliesst in ein System

Für die Prozessierung der ewz-Messdaten wurde das gleiche Vorgehen gewählt. Hier sind keine grösseren Datenlücken vorhanden. Lediglich einzelne Zeitschritte fehlen, welche durch die Werte des vorherigen Zeitschritts ergänzt wurden. Mit Hilfe der elektrischen Leistungsbezüge der Wärmepumpe kann der COP der Wärmepumpe sowie Arbeitszahlen berechnet werden. Der COP wird mit folgender Formel berechnet:

$$COP = \frac{Q_{H,FBH} + Q_{WW}}{P_{el,WPs}} \quad (3)$$

Eine zeitliche Verschiebung von 2 Zeitschritten respektive 30 Minuten zwischen den ewz-Daten und den HSLU-Daten wurde festgestellt und bei den Auswertungen und der COP-Berechnung berücksichtigt. Für die Berechnung der Arbeitszahlen (monatliche AZ und Jahresarbeitszahl JAZ) wird folgende Gleichung verwendet:

$$AZ_i = \frac{E_{th,FBH,i} + E_{th,WW,i}}{E_{el,WPs,i}} \quad (4)$$

Des Weiteren wird eine Einschätzung über Anzahl aktive Wärmepumpen sowie deren Laufzeit durchgeführt. Aufgrund des Umstands, dass der Messpunkt alle Wärmepumpen zusammenfasst, wurde die Messgrösse wie im Folgenden aufgelistet in drei Bereiche eingeteilt:

- Keine aktiven Wärmepumpen 0.0 – 0.5 kW_{el}
- Eine aktive Wärmepumpe 0.5 – 1.5 kW_{el}
- Zwei aktive Wärmepumpen 1.5 – 3.0 kW_{el}
- Drei aktive Wärmepumpen > 3.0 kW_{el}

Resultate

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Jahresanalyse dargestellt. Dies beinhaltet die Bilanzierung der quellenseitigen Energieströme sowie Ausführungen zum thermischen und elektrischen Energiebedarf des Gebäudes. Des Weiteren werden die wichtigsten Komponenten des Wärmeversorgungssystems beleuchtet. Im letzten Kapitel wird auf die Untersuchung der Betriebsmodi Heizen, Kühlen, Warmwasser und Regeneration der Erdwärmesonden fokussiert.

Energiebilanzierung des B35-Systems

Bei der Energieanalyse des B35-Wärmeversorgungssystems wird zwischen der Verbraucherseite und der Quellenseite unterschieden. Abbildung 12 verbildlicht den Wärmeenergiebedarf fürs Heizen und Warmwasser. Der grösste Heizwärmebedarf zeigt sich im Februar 2012 mit $16.1 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$, gefolgt vom Januar 2013 mit $15.1 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Der Wärmebedarf für Warmwasser zeigt ein konstantes Verhalten mit einem mittleren Bedarf von rund $0.67 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Während den Sommermonaten reduziert sich der Heizwärmebedarf auf durchschnittlich $0.9 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Für die gesamte Untersuchungsperiode ergibt sich ein Heizwärmebedarf von $82.4 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ und ein Wärmebedarf für Warmwasser von rund $8.1 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$.

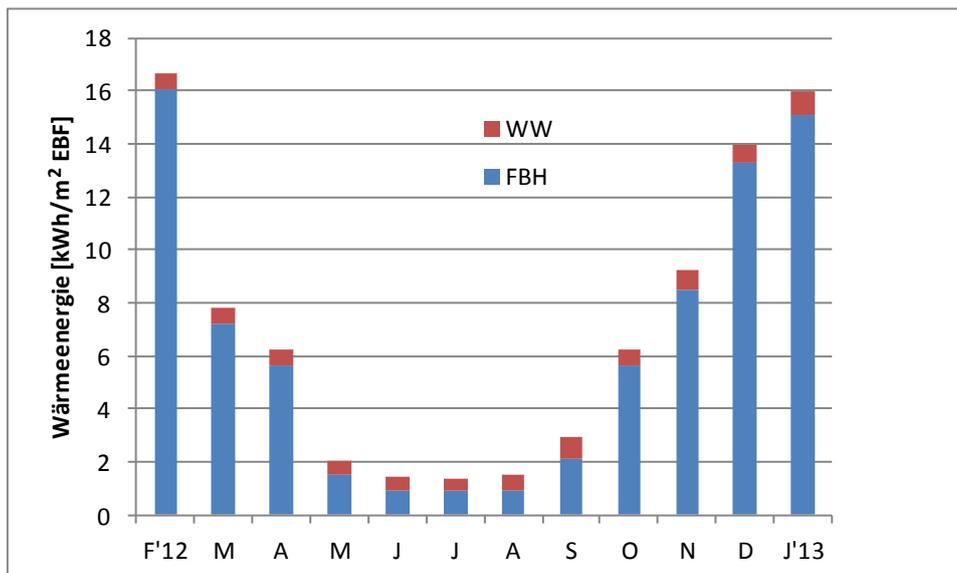


Abb. 12: Energiebedarf Raumwärme & Warmwasser (Feb'12 - Jan'13)

Der elektrische Bedarf ist in der Abbildung 13 dargestellt. Der allgemeine Stromzähler zeigt ein konstantes Verhalten mit einem durchschnittlichen Stromverbrauch von $1.14 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Der Stromverbrauch der Wärmepumpen folgt dem Jahresheizverlauf mit dem grössten Bedarf in den Wintermonaten mit durchschnittlich $2 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Für die Untersuchungsperiode ergibt sich somit ein Strombedarf für die Wärmepumpen von $13.6 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Der Strombedarf für die Aggregate am allgemeinen Stromzähler summiert sich auf $13.5 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Somit beläuft sich der totale elektrische Energiebedarf auf $27.1 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Die detaillierten Werte können in der Tabelle 1 (unten) eingesehen werden.

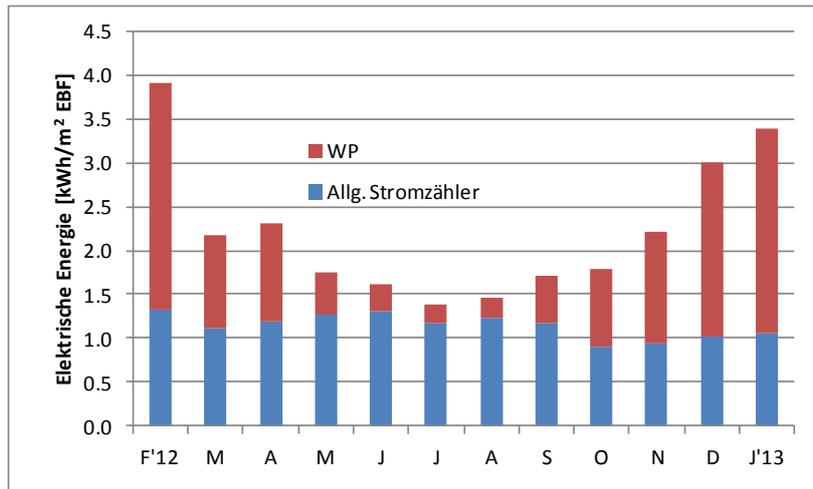


Abb. 13: Strombedarf WP & Allg. Stromzähler (Feb'12 - Jan'13)

Die Bilanzierung der quellenseitigen Energieströme beschreibt eine Gegenüberstellung der Wärmeströme zwischen den Komponenten, welche für die Wärmebereitstellung sowie für die Regeneration der Erdwärmesonden verantwortlich sind. Abbildung 14 zeigt die grafische Darstellung der Messdatenauswertung pro Quadratmeter Energiebezugsfläche. Die detaillierten Werte sind in der Tabelle 1 aufgeführt. Die Abbildung 14 zeigt auf der positiven y-Achse jeweils die Wärmeströme aus einem System und auf der negativen Achse die Wärmeströme in ein System. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass der Wärmebezug durch die Wärmepumpen hauptsächlich durch die Erdwärmesonden gedeckt wird. Der grösste Wärmeentzug aus den Erdwärmesonden findet im Februar 2012 mit $13.0 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ statt. Über den Zeitraum der Untersuchungsperiode wird total $59.1 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ den Erdwärmesonden entzogen und $16.7 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ eingespeist. Den Erdwärmesonden wird somit netto $42.4 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ entzogen. Das Hybridkollektorfeld weist einen Wärmeertrag von total rund $9.8 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ auf. In der Grafik ist ersichtlich, dass der Hauptertrag zwischen Mai und September anfällt (siehe auch Abb. 22). Der grösste Ertrag zeigt sich im August 2012 mit $2.2 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Der Wärmeertrag der Fussbodenregister für den Betriebsmodus „Passive Kühlung“ weist das gleiche Verhalten auf. Der totale Wärmeertrag beläuft sich auf $6.4 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Den Erträgen der Anergiequellen steht ein totaler Wärmebezug der Wärmepumpe von $68.9 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ gegenüber. Somit weist die Energiebilanz basierend auf der Gleichung (1) schlussendlich eine Differenz von rund $-10.2 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ (siehe Tab. 1). Die grössten Diskrepanzen mit durchschnittlich $2 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$ treten in den Übergangsmonaten April, Mai und September auf.

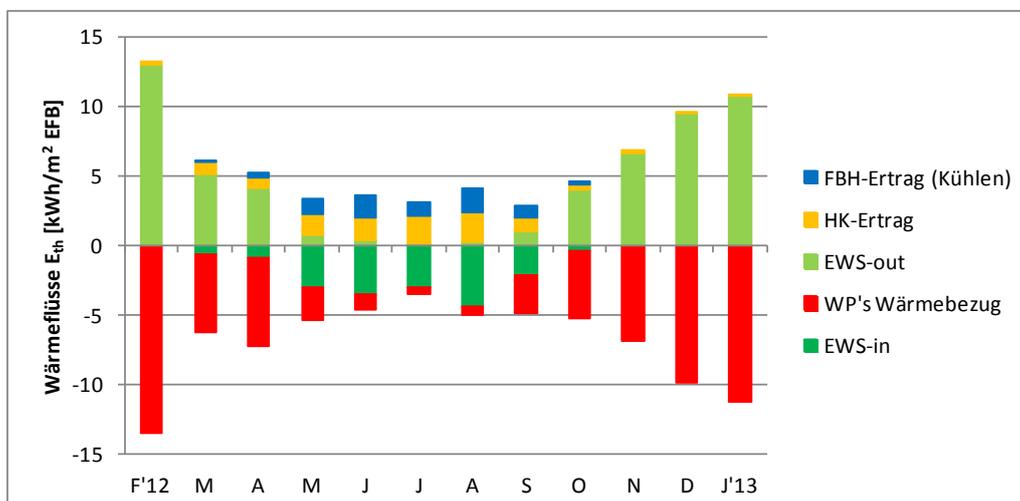


Abb. 14: Jahreswärmeenergiebilanz Quellenseite (Feb'12 - Jan'13)

Wärmeenergiebilanz der Quellenseite für die Periode Feb '12 bis Jan '13

[kWh/m ² EBF]	Feb '12	Mrz '12	Apr '12	Mai '12	Jun '12	Jul '12	Aug '12	Sep '12	Okt '12	Nov '12	Dez '12	Jan '13	Periode
EWS Total	13.01	4.36	3.27	-2.30	-3.16	-2.95	-4.29	-1.14	3.58	6.63	9.48	10.76	42.41
<i>EWS-out</i>	13.01	5.06	4.15	0.70	0.35	0.15	0.18	1.02	4.03	6.63	9.48	10.76	59.07
<i>EWS-in</i>	0.00	-0.70	-0.88	-3.00	-3.52	-3.10	-4.46	-2.16	-0.44	0.00	0.00	0.00	-16.65
<i>EWS.1.1 150m</i>	1.99	0.79	0.56	-0.04	-0.33	-0.99	-1.44	0.12	0.55	0.80	1.20	1.69	5.65
<i>EWS1.2 380m</i>	5.49	2.06	1.59	-1.18	-1.31	-0.48	-0.75	-0.62	1.85	3.39	4.50	4.43	21.23
<i>EWS2.1 150m</i>	1.77	0.48	0.60	-0.04	-0.31	-0.80	-1.23	0.05	0.52	0.77	1.14	1.52	5.16
<i>EWS2.2 300m</i>	3.76	1.02	0.52	-1.04	-1.21	-0.69	-0.87	-0.69	0.66	1.66	2.64	3.13	10.37
HK-Ertrag	0.21	0.85	0.69	1.45	1.67	1.92	2.22	0.99	0.30	0.16	0.01	0.14	9.77
FBH-Ertrag (Kühlen)	0.00	0.08	0.32	1.18	1.55	0.97	1.65	0.87	0.21	0.00	0.00	0.00	6.44
WP's Wärmebezug	-13.53	-5.60	-6.43	-2.38	-1.14	-0.45	-0.55	-2.72	-4.81	-6.89	-9.87	-11.33	-68.85
<i>WP1 in</i>	-0.54	-0.56	-0.52	-0.49	-0.45	-0.45	-0.55	-0.77	-0.58	-0.64	-2.17	-2.73	-11.21
<i>WP2 in</i>	-6.46	-3.84	-5.05	-1.89	-0.69	0.00	0.00	-1.95	-3.44	-5.02	-5.40	-5.31	-40.83
<i>WP3 in</i>	-6.52	-1.19	-0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.79	-1.23	-2.30	-3.28	-16.81
Energiebilanz	-0.31	-0.30	-2.15	-2.05	-1.09	-0.51	-0.97	-2.00	-0.72	-0.11	-0.29	-0.34	-10.23

Wärmeenergiebedarf Heizen und Warmwasser für die Periode Feb '12 bis Jan '13

[kWh/m ² EBF]	Feb '12	Mrz '12	Apr '12	Mai '12	Jun '12	Jul '12	Aug '12	Sep '12	Okt '12	Nov '12	Dez '12	Jan '13	Periode
FBH	16.05	7.20	5.67	1.48	0.94	0.87	0.88	2.07	5.61	8.46	13.28	15.13	82.39
WW	0.62	0.64	0.59	0.55	0.51	0.51	0.64	0.90	0.66	0.76	0.73	0.89	8.12
Total Wärmebedarf	16.67	7.84	6.26	2.04	1.45	1.39	1.52	2.97	6.27	9.22	14.00	16.02	90.50

Elektrische Energiebilanz für die Periode Feb '12 bis Jan '13

[kWh/m ² EBF]	Feb '12	Mrz '12	Apr '12	Mai '12	Jun '12	Jul '12	Aug '12	Sep '12	Okt '12	Nov '12	Dez '12	Jan '13	Periode
Allg. Stromzähler	1.32	1.12	1.19	1.27	1.30	1.16	1.23	1.17	0.90	0.94	1.01	1.06	13.50
WP	2.58	1.06	1.12	0.48	0.31	0.22	0.24	0.53	0.88	1.27	2.00	2.32	13.60
Total Strombezug	3.90	2.17	2.32	1.74	1.61	1.38	1.46	1.71	1.78	2.21	3.01	3.38	27.10
HK-Ertrag pro m² EBF	0.19	0.57	0.52	0.80	0.75	0.75	0.76	0.46	0.20	0.13	0.06	0.08	4.88
HK-Ertrag pro m² A_{HK}	4.34	13.23	12.02	18.42	17.24	17.34	17.48	10.68	6.01	3.89	1.69	2.46	124.80
EBF [m²]	683	899	899	899	899	755							

Tab. 1: Oben. Wärmeenergiebilanz Quellenseite. Mitte: Wärmeenergiebilanz Lastseite; Unten: elektrische Energiebilanz

Wärmepumpe und Fussbodenregister

Abbildung 15 zeigt die Heizlastkurve des B35-Gebäudes. Die Spitzenlast tritt in der Untersuchungsperiode während rund 425h auf und widerspiegelt die Situation, wenn alle drei Wärmepumpe für die Raumwärme aktiviert worden sind. Während rund 1800h tritt eine mittlere Last mit zwei aktiven Wärmepumpen auf. Die Grundlast kommt während ca. 2'200h auf. Diese Werte können durch die ewz-Daten annähernd bestätigt werden. Abbildung 16 zeigt eine Einschätzung über die Betriebsstunden aller Wärmepumpen anhand der ewz-Daten und beinhaltet somit auch die Betriebsstunden für die Warmwasseraufbereitung. Es zeigt sich, dass die Wärmepumpen während rund 5'000 Stunden im Jahr im Betrieb sind.

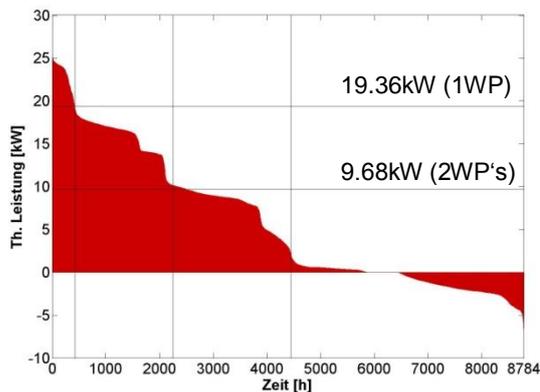


Abb. 15: Heizlastkurve Q_{FBH} (Feb'12 - Jan'13)

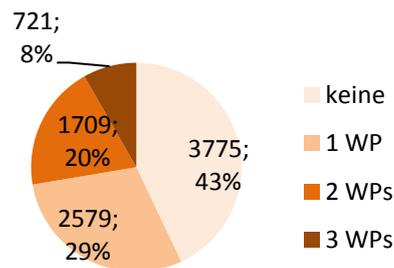


Abb. 16: Betriebsstunden WP's aus Strombezugsdaten ewz (Feb'12 - Jan'13)

Für die Beurteilung des Leistungsverhaltens der Wärmepumpe im Heizfall wird die Situation im Dezember näher betrachtet. Abbildung 17 (oben) zeigt die Temperaturen bei der Wärmepumpe 2. Die untere Grafik widerspiegelt den realen COP. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass bei der COP-Berechnung die Wärmepumpen als ein Aggregat verstanden werden. Folglich wird angenommen, dass die Wärmepumpen 1 und 3 im Heizfall identische Temperaturen aufweisen. Bis zum 15. Dezember sind meistens zwei bis drei Wärmepumpen aktiv. Es zeigt sich, dass während dieser Zeit höhere Temperaturen in der Fussbodenheizung erreicht werden. Gleichzeitig werden die Erdwärmesonden stark belastet, wodurch sich die Quelltemperatur der Wärmepumpe reduziert. Dies hat Auswirkungen auf den COP, der sich zwischen 5 und 7.5 bewegt. Ab dem 15. Dezember ist abgesehen von der Periode zwischen 21. und 23. Dezember nur die Wärmepumpe 2 aktiv. Der Temperaturhub ist kleiner, wodurch sich der COP erhöht. Es werden Werte zwischen 7 und 9 erreicht. Diese Werte sind auch im Einklang mit der monatlichen Arbeitszahl von 7 für den Dezember 2012. Der Grund für die grössere Streuung ab Mitte Monat ist nicht eruierbar.

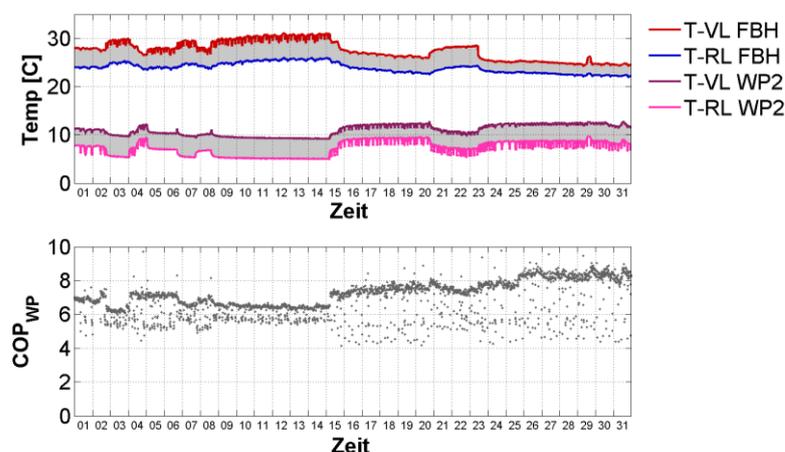


Abb. 17: Oben: Vor- und Rücklauftemperaturen FBH & WP2. Unten: COP_{WP}

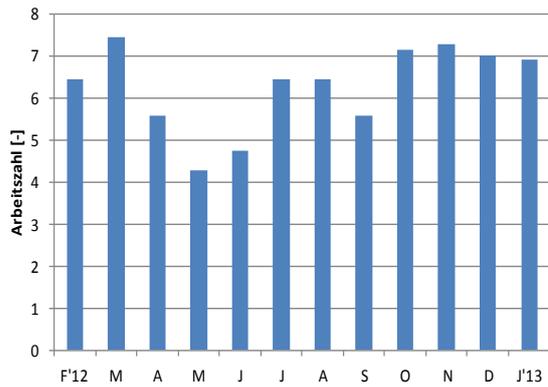


Abb. 18: Monatliche Arbeitszahl der WP (Feb'12 - Jan'13)

Abbildung 18 zeigt die monatliche Arbeitszahl der aggregierten Wärmepumpen. Die Arbeitszahl bewegt sich für die meisten Monate zwischen 6 und 7 mit Ausreißern nach unten in den Übergangsmonaten April, Mai, Juni und September. Der Grund für die tieferen Werte konnte nicht identifiziert werden. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen für die untersuchte Periode beläuft sich schlussendlich auf 6.66.

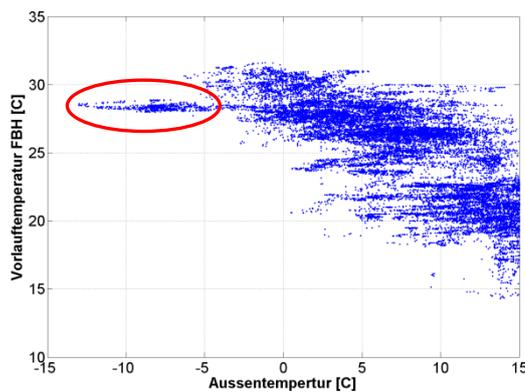


Abb. 19: Vorlauftemperatur FBH als Funktion der Aussentemperatur (Feb'12 - Jan'13)

In der Abbildung 19 ist die Vorlauftemperatur der Fussbodenheizung als Funktion der Aussentemperatur dargestellt. Wie sich zeigt, wird das Gebäude phasenweise mit einer Maximaltemperatur von bis zu 32 °C geheizt. Die Maximaltemperatur tritt v.a. im Dezember 2012 und Januar 2013 auf. Während der kältesten Periode im Februar 2012 konnte das Gebäude mit einer Vorlauftemperatur von rund 28 °C betrieben werden.

Erdwärmesonden

Abbildung 20 zeigt den spezifischen Wärmestrom pro aktivem Laufmeter und Erdwärmesonde für die Periode Februar 2012 bis Januar 2013. Während der kältesten Zeit im Februar 2012 werden die beiden langen Erdwärmesonden mit bis zu maximal 35 W/m und die beiden kurzen mit bis zu 20 W/m belastet. Es handelt sich hierbei um vereinzelte Stunden. Im Durchschnitt werden die langen Erdwärmesonden mit rund 24 W/m und die beiden kurzen Erdwärmesonden mit rund 13 W/m belastet. Ab Oktober häufen sich die Anzahl Stunden mit maximaler Belastung vor allem bei der 300m langen Erdwärmesonde. Zudem treten auch höhere Maximalbelastungen auf. Zum Beispiel kommen im Dezember 2012 zu Belastungsspitzen der 300m langen Erdwärmesonde von rund 44 W/m vor. Während der Heizperiode stammen somit rund 60-75% des Bezugs aus den langen Erdwärmesonden (siehe Abb. 21).

Im Falle der Regeneration respektive der passiven Kühlung kehrt sich das Bild. Rund 60% der Leistung fließt in die kurzen Erdwärmesonden (siehe Abb. 21). Dies zeigt sich zum Teil auch in den Regenerationsleistungen pro Sondenlänge in den Sommermonaten Juli und August 2012. Im Juli beträgt die Leistung durchschnittlich rund -15 W/m für die EWS1.1 (150m) und für die EWS2.1 (150m) noch rund -11 W/m. Zudem zeigen sich vereinzelt Spitzen von rund -38 W/m für die EWS1.1 und für die EWS2.1 von rund -32 W/m. Ähnliche Werte werden auch im August festgestellt. Die Regenerationsleistung für die langen Erdwärmesonden weisen tiefere Mittelwerte auf. Im Juli wird die EWS1.2 (380m) mit rund -4.6 W/m und die EWS2.2 (300m) mit rund -9 W/m regeneriert.

In den anderen Monaten fällt die maximale Regenerationsleistung der langen Sonden höher aus als bei den kurzen Erdwärmesonden. Im Juni ergibt sich vereinzelt eine maximale Rate von -48 W/m für die 300m Erdwärmesonde. Die 380m Erdwärmesonde weist jedoch maximal eine Rate von -29 W/m auf.

Der Jahresmittelwert der Entzugsleistung beträgt für die langen Erdwärmesonden 16.5 W/m und für die kurzen Erdwärmesonden 8 W/m . Die Regenerationsleistung beläuft sich für die EWS1.1 auf -7.2 W/m , für die EWS2.1 auf -6.2 W/m , für die EWS1.2 auf -5.4 W/m und für die EWS2.2 auf -8.3 W/m .

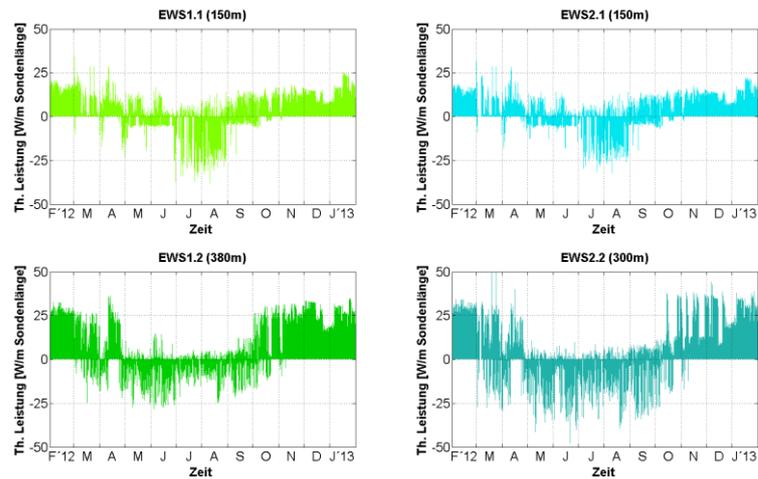


Abb. 20: Thermische Leistung der EWS pro Sondenlänge (Feb'12 - Jan'13)

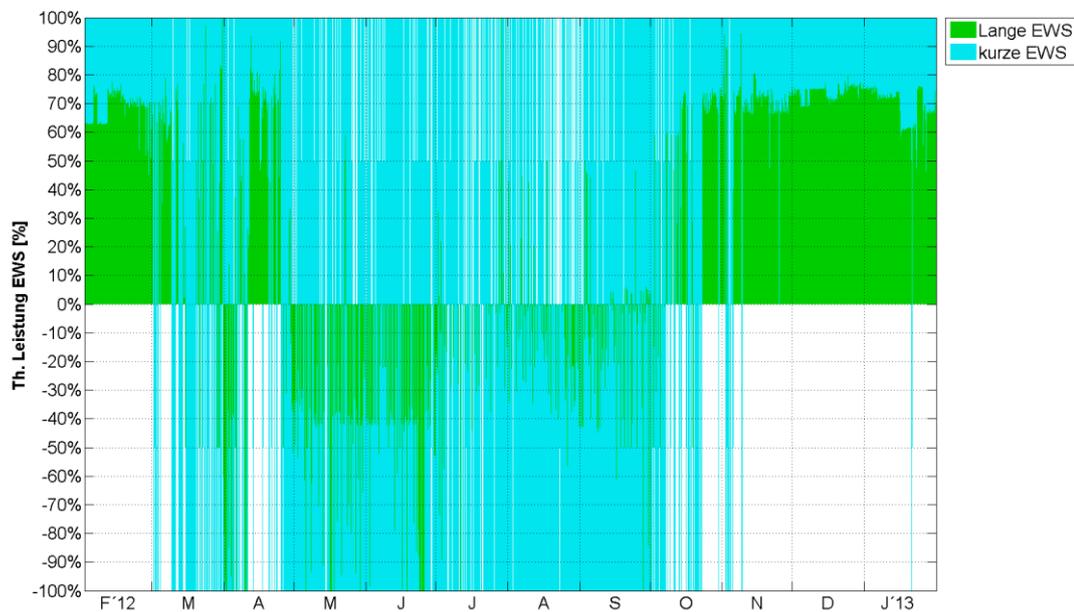


Abb. 21: Anteil des Wärmestroms der kurzen resp. langen EWS an der Gesamtleistung (Feb'12 - Jan'13)

Der Hybridkollektor

Abbildung 22 und 23 zeigen den thermischen sowie elektrischen Energieertrag pro Quadratmeter Hybridkollektorfläche (A_{HK}). Beim Vergleich der Aufteilung des elektrischen und thermischen Ertrags über die Periode zeigt sich, dass der thermische Ertrag stärker von den Aussenkonditionen (Temperatur, Wind) beeinflusst wird. Der grösste Wärmeertrag tritt mit rund $45 \text{ kWh/m}^2 A_{HK}$ im August auf, während der elektrische Ertrag im Mai mit rund $18.5 \text{ kWh/m}^2 A_{HK}$ am besten ausfällt. Der totale thermische Ertrag beläuft sich auf $234 \text{ kWh/m}^2 A_{HK}$ und Jahr. Der elektrische Jahresertrag des Hybridkollektors beträgt $125 \text{ kWh/m}^2 A_{HK}$. Auf die Energiebezugsfläche bezogen ergibt dies für die ganze Zeitperiode $4.9 \text{ kWh/m}^2 \text{ EBF}$. Somit beläuft sich der Deckungsgrad des elektrischen Bedarfs auf 18% (vgl. Tab. 1). Eine monatliche Aufteilung zeigt, dass von Mai bis August ein Deckungsgrad von rund 50% erreicht wird.

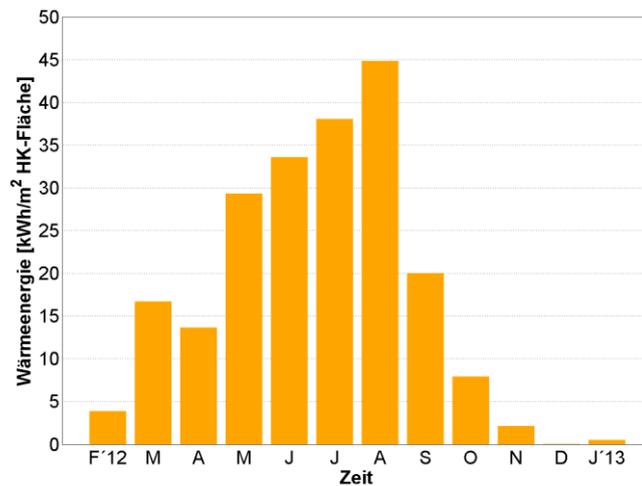


Abb. 22: Wärmeertrag des Hybridkollektors (Feb'12 - Jan'13)

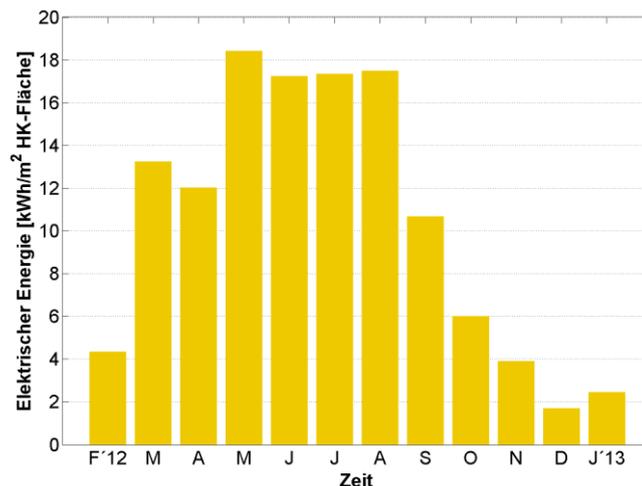


Abb. 23: Elektrischer Ertrag des Hybridkollektors (Feb'12 - Jan'13)

Untersuchung der Betriebsmodi für spezifische Perioden

Heizen – kälteste Periode

In diesem Abschnitt werden die Resultate für den Heizfall in der kältesten Zeit der Untersuchungsperiode präsentiert. Die wichtigsten Kennzahlen sind in den Abbildungen 24 bis 27 dargestellt. In diesem Zeitraum bewegt sich die Aussentemperatur zwischen -1.8 und -13 °C (Mittelwert $T_{\text{amb}} = -7.4$ °C). Für die Erhaltung der Raumtemperatur wird eine Heizleistung von $20.5 \text{ W/m}^2 \text{ EBF}$ benötigt. Die Vorlauftemperatur beträgt im Mittel 28.3 °C ($\Delta T_{\text{FBH}} = 3.3 \text{ K}$). Die Erdwärmesonden werden insgesamt im Durchschnitt $19.3 \text{ W/m}^2 \text{ EBF}$ belastet. In der Abbildung 24 zeigt sich zudem die Aufteilung der Leistungsbezüge auf die vier Erdwärmesonden. Es ist ersichtlich, dass im Verlaufe des 4. Tages eine Veränderung der Anteile stattfindet. Dies fusst in der Veränderung der Massenstromeinstellungen der Umwälzpumpen. Der Massenstrom in den kurzen Erdwärmesonden reduziert sich von 1300 kg/h auf 550 kg/h während der Massenstrom in den langen Erdwärmesonden von ursprünglich 1350 kg/h auf 1425 kg/h erhöht wird. Dies hat Auswirkungen auf die Rücklauftemperaturen, welche in der Abbildung 25 aufgeführt sind. So erhöht sich die Rücklauftemperatur der kurzen Erdwärmesonden im Schnitt um 1 °C während sich die Temperatur bei den langen Erdwärmesonden um ca. 0.5 °C reduziert. Der Effekt ist auch bei der Vorlauftemperatur der Wärmepumpe zu sehen, auch wenn er sehr klein ist. Die Zusammenführung dieser Massenströme führt zu einer mittleren Vorlauftemperatur für die Wärmepumpen von rund 10.2 °C ($\Delta T_{\text{WP2}} = 2.9 \text{ K}$). An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass in der Abbildung 26 nur die Wärmepumpe 2 dargestellt ist. Die Wärmepumpe 3 zeigt ein äquivalentes Verhalten. Die Wärmepumpen 2 und 3 sind während dieser Zeit permanent im Betrieb und beziehen eine Leistung von $4 \text{ W/m}^2 \text{ EBF}$ ($P_{\text{WP}} = 2.4 \text{ kW}$) (siehe Abb. 26). Der COP der Wärmepumpen ist in der Abbildung 27 dargestellt und beträgt durchschnittlich 5.7 . In der Abbildung zeigt sich zudem wie der COP durch die Aktivierung der Wärmepumpe 1 für die Warmwasserproduktion kurzzeitig abfällt.

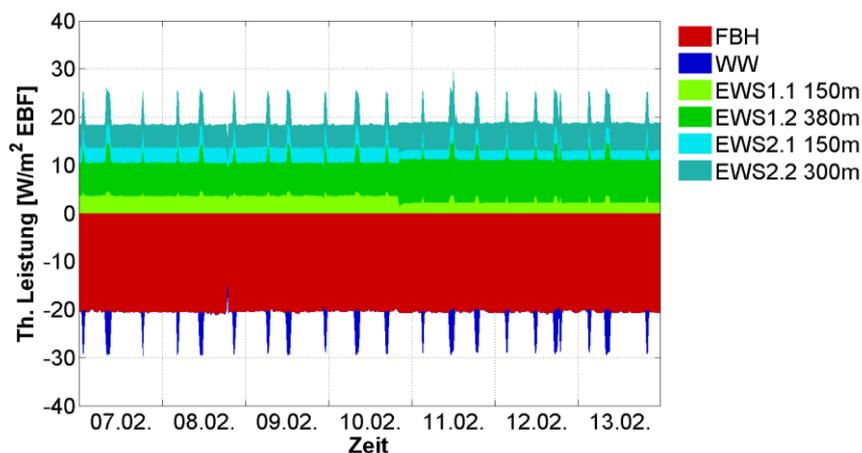


Abb. 24: Wärmestrom der FBH, WW & EWS (7.Feb'12 – 13.Feb'12)

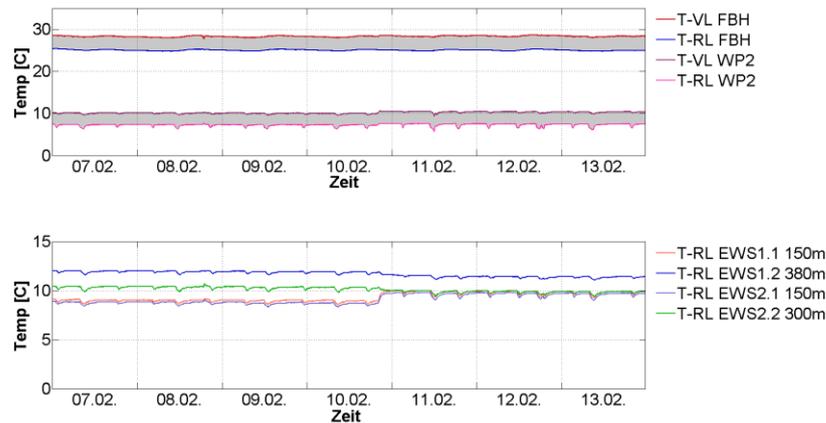


Abb. 25: Oben: Vor- & Rücklaufemperatur FBH,WP2. Unten: Rücklaufemperatur EWS (7.Feb'12 – 13.Feb'12)

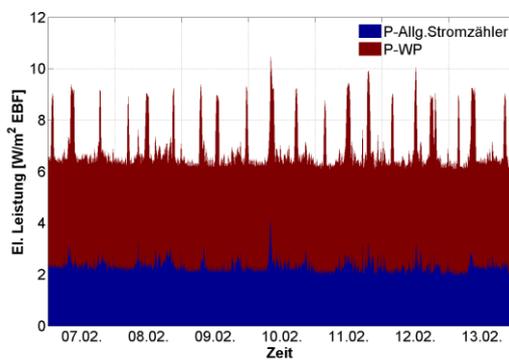


Abb. 26: Elektrischer Bezug WP,Allg.Stromzähler (7.Feb'12 – 13.Feb'12)

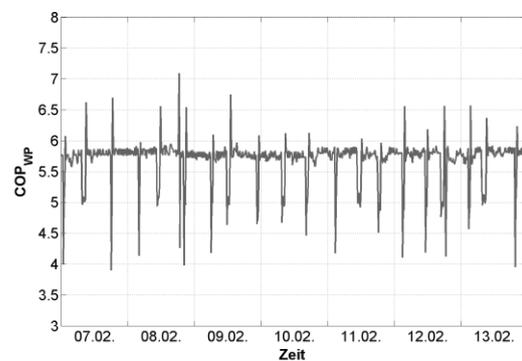


Abb. 27: Leistungszahl (COP_{WP}) der Wärmepumpe (7.Feb'12 – 13.Feb'12)

Heizen - kalte Periode

Dieser Abschnitt zeigt die Situation während einer durchschnittlich kalten Periode. Die Aussentemperatur bewegt sich in der untersuchten Periode zwischen 3.3 und 10.4 °C. Im Folgenden fokussieren die Resultate auf die Stunden, in denen nur eine Wärmepumpe im Betrieb ist. In einem nächsten Schritt werden die Auswirkungen der Zuschaltung der Wärmepumpe 3 aufgezeigt (16./17.11.12).

Die Heizleistung für die Stunden mit einer aktiven Wärmepumpe beträgt im Mittel 13 W/m² EBF. Die Bezugsleistung aus den Erdwärmesonden beläuft sich auf rund 11.4 W/m² EBF. Der elektrische Leistungsbezug der Wärmepumpe beträgt 1.9 W/m² EBF (siehe Abb. 30). Dies ergibt einen mittleren COP von 7.1 (siehe Abb. 31). Die Temperaturen im System unterscheiden sich von den Temperaturen der kältesten Periode (siehe vorhergehender Abschnitt). Die langen Erdwärmesonden weisen eine Rücklaufemperatur von 13.6 °C (EWS1.2) respektive 13.1 °C (EWS2.2) auf. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass aufgrund des definierten Heizakkords die EWS2.2 nicht aktiviert ist. Aufgrund der Massenstrombilanz entsteht trotzdem eine Durchströmung. Dies trifft auch auf die kurzen Erdwärmesonden zu (siehe Abb. 32). Somit werden alle Erdwärmesonden belastet. Die Temperatur aus den beiden kurzen Erdwärmesonden beträgt jeweils 12.6 °C. Somit ergibt sich eine Vorlaufemperatur der Wärmepumpe von rund 12.9 °C ($\Delta T_{WP2} = 3K$) Die Heizenergie wird mit einer Vorlaufemperatur von rund 26.5 °C ($\Delta T_{FBH} = 3.4K$) bereitgestellt. Wie aus der Abbildung 29 zu sehen ist, bewirkt die Zuschaltung der Wärmepumpe 3 einerseits eine Reduktion der Rücklaufemperatur der Erdwärmesonden und in Folge dessen

der Vorlauftemperaturen der Wärmepumpen. So reduziert sich die Rücklauftemperaturen der kurzen Erdwärmesonden um 1.2 °C ($T_{EWS1.1}=11.3$ °C) und 1.5 °C ($T_{EWS2.1}=11.1$ °C). Die Rücklauftemperaturen der langen Erdwärmesonden sinkt um 0.8 °C ($T_{EWS1.2}=12.7$ °C) und 1.5 °C ($T_{EWS2.2}=11.2$ °C). Die Vorlauftemperatur der Wärmepumpen reduziert sich auf 11.4°C. Andererseits erhöht sich die Vorlauftemperatur der Fussbodenheizung auf 27.7 °C ($\Delta T_{FBH} = 4.1$ K). Für den COP bewirkt dies eine kleine Reduktion um 0.2 auf 6.9 (siehe Abb. 31). Der Heizleistungsbedarf erhöht sich auf durchschnittlich 24 W/m² EBF und liegt somit höher als während der kältesten Periode (vgl. Abb. 24). Dennoch fällt der COP wegen des kleineren Temperaturhubes höher aus. Der Grund des höheren Wärmebedarfs kann anhand der Daten nicht identifiziert werden, jedoch hat sicherlich die zusätzliche Nutzung des Reservoirs als Bürofläche einen Einfluss auf das Systemverhalten.

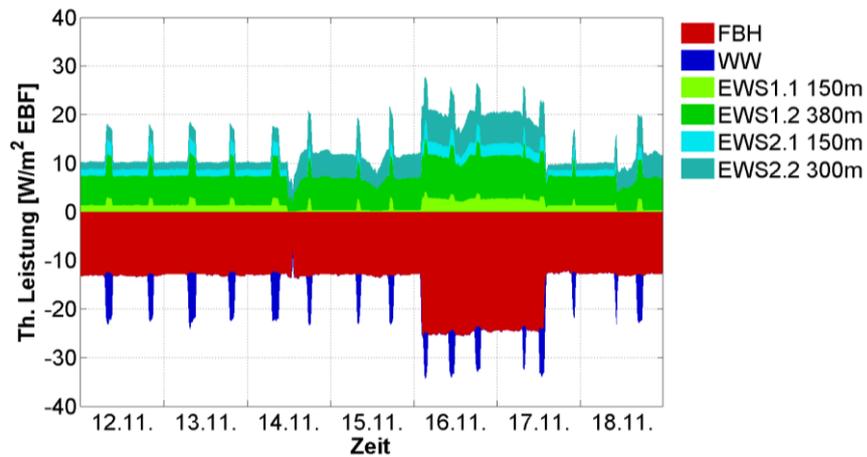


Abb. 28: Kalte Periode: Thermische Leistung FBH,WW & EWS (12.Nov'12 – 18.Nov'12)

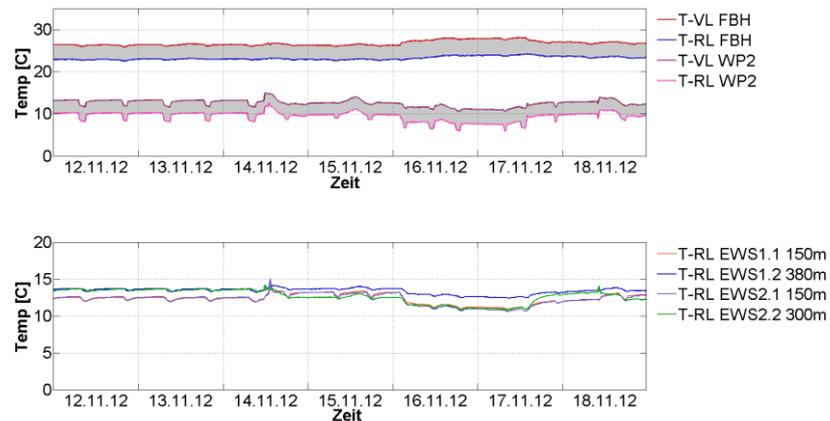


Abb. 29: Kalte Periode: Oben: Vor- & Rücklauftemperatur der FBH & WP2. Unten: Rücklauftemperaturen der EWS (12.Nov'12 – 18.Nov'12)

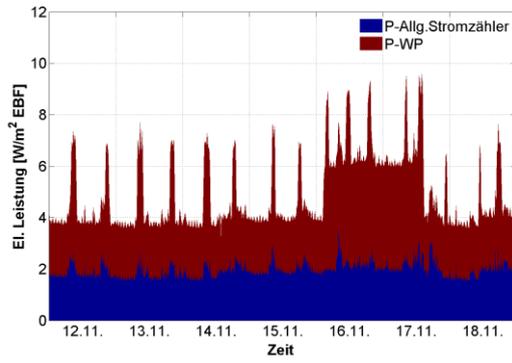


Abb. 30: Kalte Periode: Elektrische Leistung WP & Allg. Stromzähler (12.Nov'12 – 18.Nov'12)

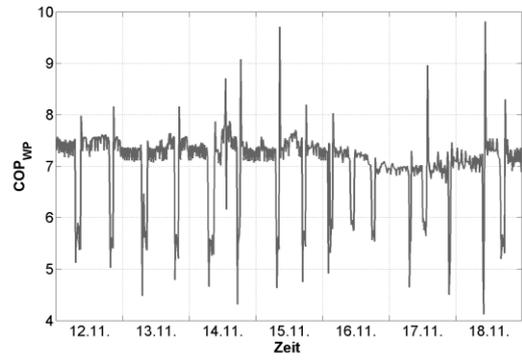


Abb. 31: Kalte Periode: Leistungszahl (COP_{WP1}) der WP1 (12.Nov'12 – 18.Nov'12)

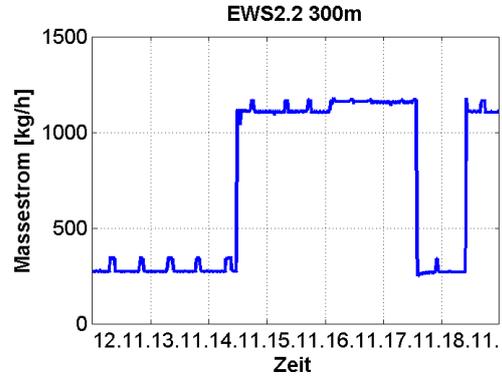
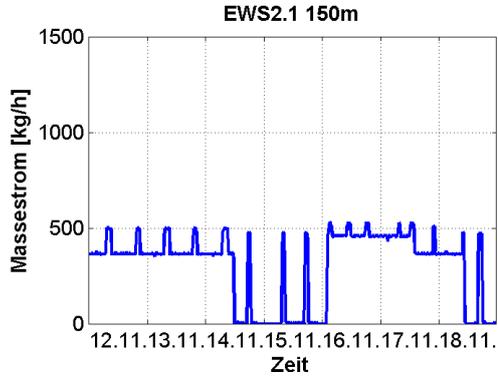
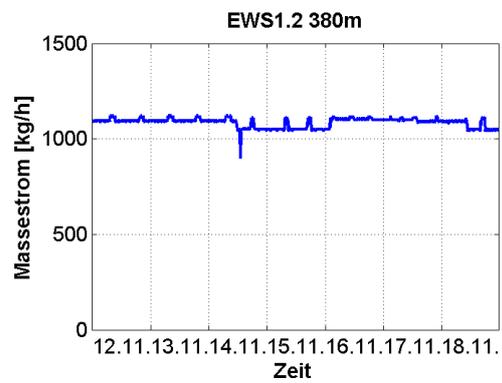
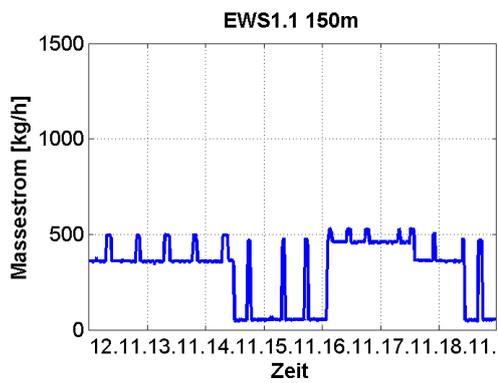


Abb. 32: Kalte Periode: Massenstrom der EWS (12.Nov'12 – 18.Nov'12)

Warmwasser

In der Abbildung 33 sind die Wärmeströme der EWS und des Warmwasserspeichers abgebildet. In der untersuchten Periode sind drei verschiedene Betriebsfälle vorhanden. Die Punkte 1, 3 und 5 repräsentieren die Warmwasseraufbereitung mit den Erdwärmesonden als Quelle. Punkt 2 zeigt die Warmwasseraufbereitung mit dem Hybridkollektor als Quelle. Im Punkt 4 und 6 werden beide Quellen verwendet. Hinsichtlich den relevanten Temperaturen zeigen sich auf der Lastseite keine grossen Unterschiede zwischen den Betriebsfällen (siehe Abb. 34). Die Vor- und Rücklauftemperatur des Warmwasserspeichers beläuft sich im Durchschnitt auf 44 °C respektive 39.3 °C. Die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe 1 variiert je nach Quelle. So ergibt sich eine Temperatur mit der Erdwärmesonde als Quelle von 16.1 °C, mit dem Hybridkollektor eine Temperatur von 19.6 °C und wenn beide Quellen verwendet werden, beträgt die Temperatur rund 18 °C (siehe Abb. 34 unten). Dies zeigt sich schön im COP: $COP_{WP1,q-EWS} = 4.5$, $COP_{WP1,q-HK} = 5.3$ $COP_{WP1,q-EWS\&HK} = 5.1$ (siehe Abb. 35).

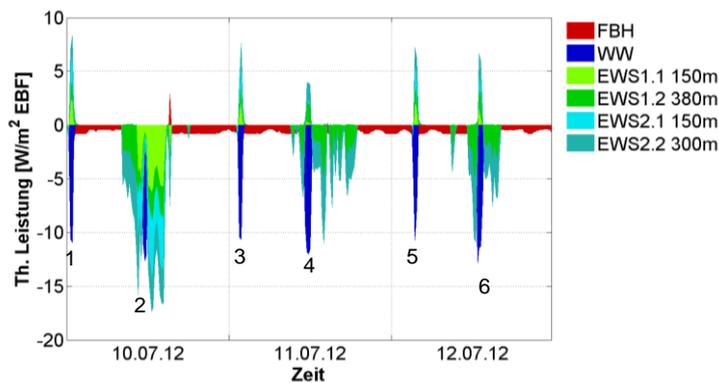


Abb. 33: Warmwasser: Wärmestrom FBH, WW & EWS (10.Jul'12 – 12.Jul'12)

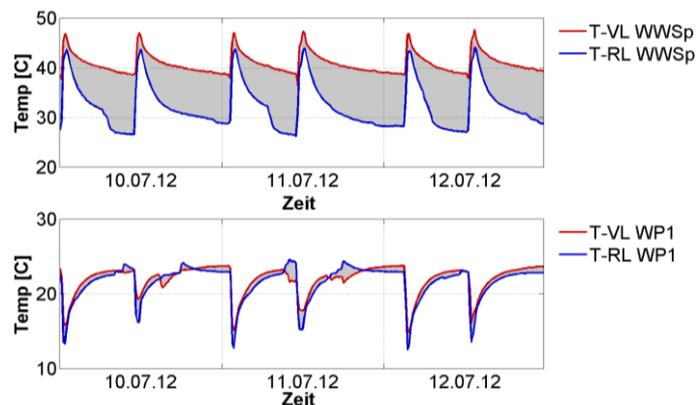


Abb. 34: Warmwasser: Oben: Vor- & Rücklauftemperatur WWSp. Unten: Vor- & Rücklauftemperatur WP1 (10.Jul'12 – 12.Jul'12)

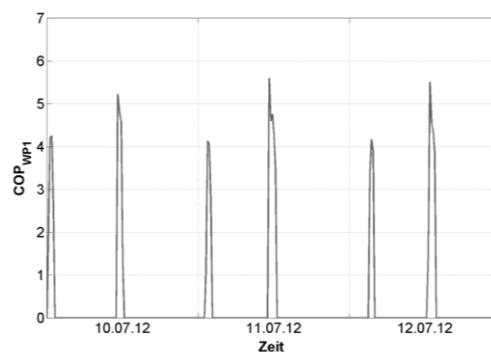


Abb. 35: Warmwasser: Leistungszahl (COP_{WP1}) 10.Jul'12 – 12.Jul'12)

Passive Kühlung

In der Abbildung 36 sind die Wärmeströme der kurzen Erdwärmesonden und der Lastseite (FBH und WW) abgebildet. Während der Untersuchungsperiode tritt auch die Regeneration der langen Erdwärmesonden auf. Jedoch soll hier der Fokus alleine auf die passive Kühlung gelegt werden. Die Aussentemperatur beträgt in der untersuchten Periode im Mittel rund 25.6 °C mit einem maximalen Wert von 35.5 °C. Die Kühlleistung der Fussbodenheizung beträgt im Mittel 6.2 W/m² EBF. Dem steht eine Regenerationsleistung in die kurzen Erdwärmesonden von 7.2 W/m² EBF gegenüber. In der Abbildung 37 sind die Vor- und Rücklauftemperaturen der kurzen Erdwärmesonden und der Fussbodenheizung dargestellt. Die Rücklauftemperatur der Fussbodenheizung beläuft sich auf 22.8 °C ($\Delta T_{\text{FBH}} = 0.87$ °C). Die Regeneration in den kurzen Erdwärmesonden findet mit einer Temperatur von rund 21.1 °C statt. Die Rücklauftemperatur der kurzen Erdwärmesonden beträgt im Mittel 19.3 °C.

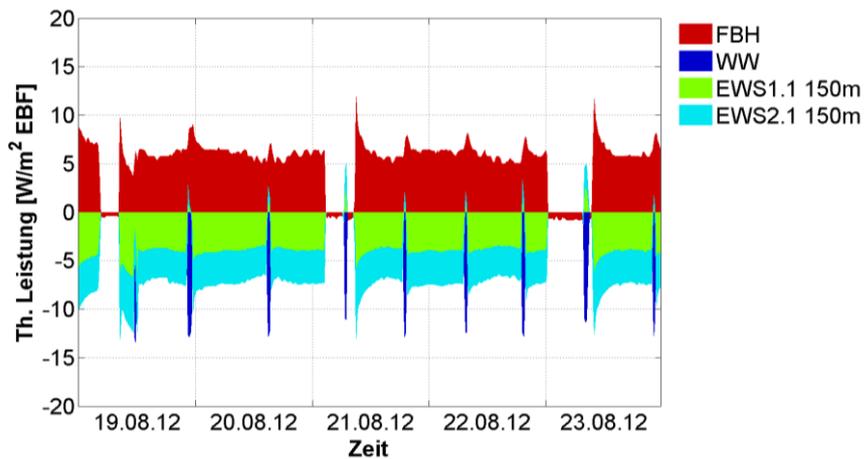


Abb. 36: Passive Kühlung - Wärmestrom FBH,WW & kurze EWS (18. Aug'12 – 23.Aug'12)



Abb. 37: Passive Kühlung. Oben: Vor- & Rücklauftemperatur FBH. Mitte: Vor- & Rücklauftemperatur EWS1.1. Unten: Vor- & Rücklauftemperatur EWS2.1(18. Aug'12 – 23.Aug'12)

Regeneration

Die Wärmeströme des Hybridkollektors und der zwei langen Erdwärmesonden im Regenerationsfall sind in der Abbildung 38 dargestellt. Während dieser Periode bewegt sich die Aussentemperatur zwischen 13.9 und 32.8 °C mit einem Mittelwert von 23.8 °C. Die Solarstrahlung beträgt während des Tages durchschnittlich 412 W/m² mit einem Maximalwert von 830 W/m². Die thermische Leistung des Hybridkollektors schlägt sich mit durchschnittlich 9.4 W/m² EBF zu Buche. Der Wärmestrom in die Erdwärmesonden beträgt rund 9.9 W/m² EBF. Hinsichtlich des Hybridkollektors sind jedoch die Werte pro Quadratmeter Hybridkollektorfläche interessanter, welche in Abbildung 39 verbildlicht sind. Die thermische Leistung beträgt über die Periode 216 W/m² A_{HK} mit einem Maximum von 457 W/m² A_{HK}. Die elektrische Leistung beläuft sich im Durchschnitt auf rund 49 W/m² A_{HK} mit einem Maximum von 114 W/m² A_{HK}. Die relevanten Temperaturen sind in Abbildung 40 dargestellt. Die Rücklauftemperatur des Hybridkollektors beträgt im Mittel 32.1 °C mit einem maximalen Wert von 45.9 °C. Die Vorlauftemperatur des Hybridkollektors beträgt 19.3 °C. Die Vorlauftemperaturen bei den beiden langen Erdwärmesonden beträgt im Mittel 21.4 °C. Die maximale Regenerationstemperatur beläuft sich auf 24.7 °C.

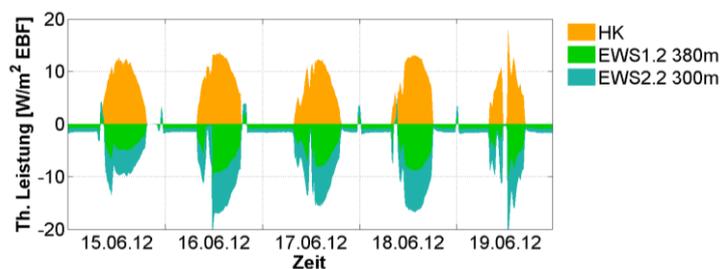


Abb. 38. Regeneration: Wärmestrom HK & lange EWS (15.Jun'12 – 19.Jun'12)

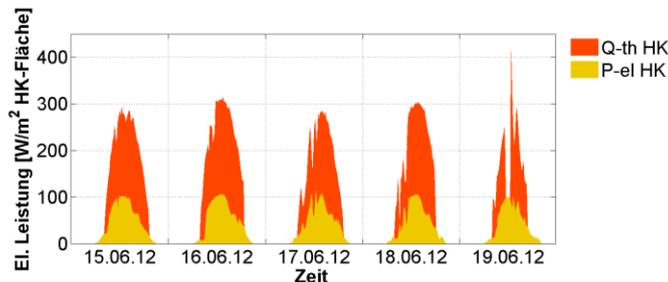


Abb. 39: Regeneration: Thermische Leistung HK 15.Jun'12 – 19.Jun'12)



Abb. 40: Regeneration: Oben: Vor- & Rücklauftemperatur HK. Mitte: Vor- & Rücklauf-temperatur EWS1.2. Unten: Vor- & Rücklauftemperatur EWS2.2(15.Jun'12 – 19.Jun'12)

Vergleich mit Benchmarkwerten

In diesem Kapitel wird der Versuch unternommen, die gemessenen Verbrauchswerte einzuordnen und mit den Zielwerten von Minergie sowie des SIA-Effizienzpfades zu vergleichen.

Dazu ist Folgendes zu bemerken:

- Die Primäranforderungen nach Minergie können nicht verglichen werden, da zum gemessenen Wärmebedarf weder Angaben über die effektiven Raumtemperaturen noch über den effektiven Luftwechsel während der Messperiode vorliegen und somit kein Bezug zu einer Berechnung des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1 mit Standardluftwechsel und konstanter Raumtemperatur von 20°C hergestellt werden kann.
- Im 8. Monat der Messperiode ging das im Haus integrierte Reservoir als Büroraum in Betrieb, wodurch sich sowohl die Energiebezugsfläche als auch die Nutzung änderte. Für den Vergleich mit dem SIA-Effizienzpfad wurden jedoch nur die Richtwerte „Betrieb / Neubau“ der Kategorie Wohnen berücksichtigt.
- Die Energie für Hilfsantriebe und Lüftung konnten nur geschätzt werden, da diese nicht separat erfasst wurden.

Der Vergleich der gewichteten Endenergie mit den Vorgaben von Minergie ist im folgenden Diagramm dargestellt. Dabei wurden einerseits die gemessenen Werte berücksichtigt (Istzustand), als auch die geplante Erweiterung der Hybridkollektorfläche auf das Zweifache der während der Messperiode vorhandenen (geplant). Der Strom-Gewichtungsfaktor liegt für Minergie-Berechnungen bei 2.

Ungewichtet [kWh/m ² EBF]	B35
Strom WP	13.6
Lüftung (Annahme)	4
Hilfsenergie (Annahme)	2.5
Ertrag Hybridkollektoren (HK)	-4.88
Ertrag HK geplant (doppelte Fläche)	-9.76
Total Istzustand	15.22
Total geplant	10.34

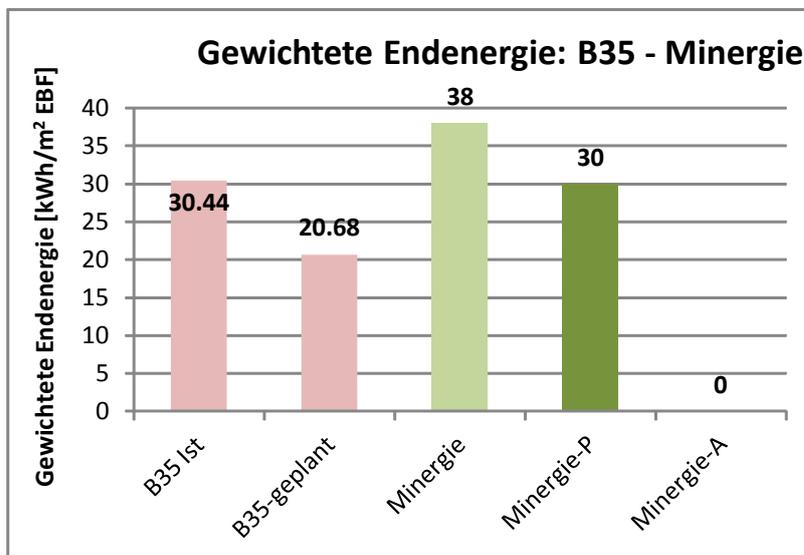


Abb. 41: Gewichtete Endenergie, Vergleich B35 und Minergie

Der Vergleich mit den Vorgaben des SIA-Effizienzpfads ist in nachfolgender Graphik dargestellt. Auch hier wurden einerseits die gemessenen Werte berücksichtigt (Istzustand), als auch die geplante Erweiterung der Hybridkollektorfläche auf das Zweifache der während der Messperiode vorhandenen (geplant).

	(Strom CH-Mix)	Ökostrom (PV)
PE-Faktor NE	2.64 [-]	0.4 [-]
THG-Faktor	0.148 kg CO ₂ /kWh	0.0936 kg CO ₂ /kWh

Bilanz Endenergieverbrauch/-produktion

[kWh/m ² EBF]	B35
Allgemeiner Strom	13.5
Strom WP	13.6
Ertrag HK	-4.88
Ertrag HK geplant	-9.76
Total	22.22
Total geplant	17.34

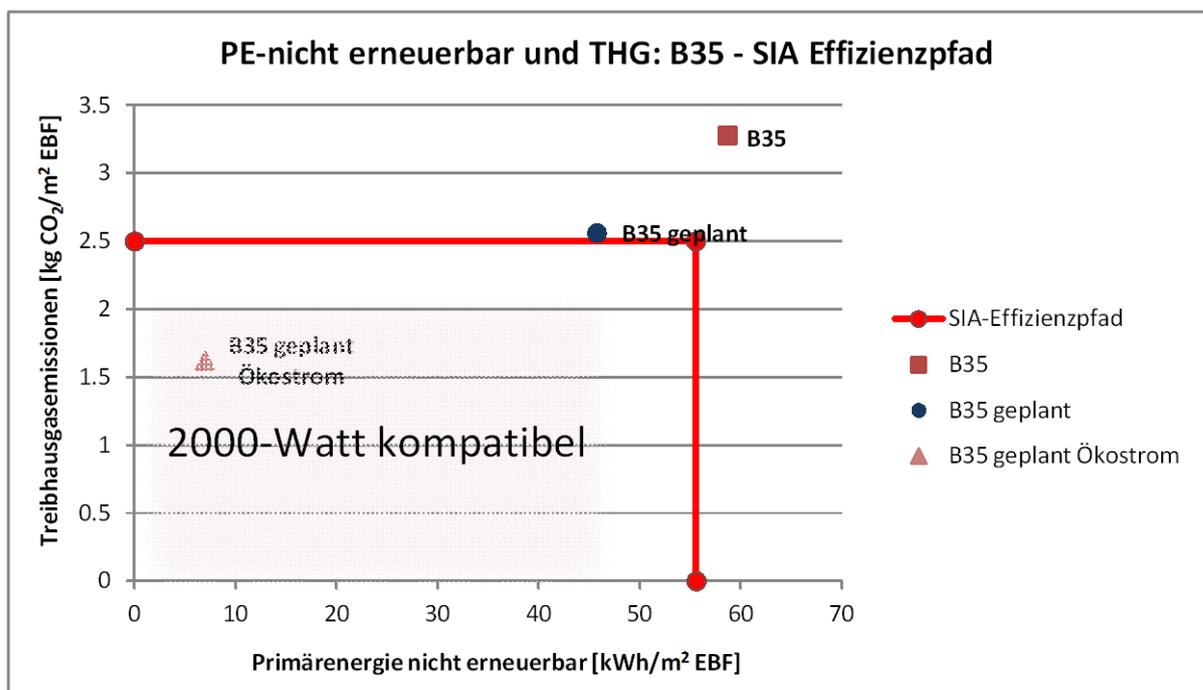


Abb. 42: B35 im Vergleich zu den Vorgaben des SIA-Effizienzpfads

Die Faktoren zur Gewichtung der Treibhausgasemissionen sowie für die nicht erneuerbare Energie wurden zunächst gemäss Schweizer Strommix angesetzt. Da das Konzept des B35-MFH grundsätzlich vorsieht, dass zur Deckung des Strombedarfs Zertifikatskäufe für Wind- und Sonnenenergie vorgesehen sind, wurde zudem beispielhaft eine Variante mit Gewichtungsfaktoren gemäss Stromproduktion aus Photovoltaik dargestellt.

Diskussion

Die Komplexität des B35 und die Datengrundlage

Das Mehrfamilienhaus B35 wurde mit der Zielsetzung erstellt, möglichst alle lokalen Energiequellen zu erschliessen und in das Energieversorgungskonzept zu integrieren. Für die Umsetzung der hohen konzeptionellen Anforderungen an das Wärmeversorgungssystem wurde eine komplexe hydraulische Verschaltung mit zahlreichen Pumpen und Ventilen entwickelt, so dass die Übertragung von Wärme zwischen nahezu allen Hauptkomponenten des Systems ermöglicht wurde. Mit Hilfe der Gebäudeautomation werden schlussendlich die verschiedenen Betriebsakkorde, welche zum Teil auch parallel laufen können, aktiviert. Mit der Inbetriebnahme des Systems sind verschiedene Schwierigkeiten zum Vorschein gekommen und folglich mussten Anpassungen in der Gebäudesteuerung vorgenommen werden. So wurden zum Beispiel zu Beginn die Erdwärmesonden mit Ventilen angesteuert damit eine klare Entkopplung vollzogen werden konnte. Jedoch sind Situationen eingetreten mit aktivierter Wärmepumpe und entkoppelten Erdwärmesonden, was zu einer kaskadenartigen Reduktion der Quelltemperatur und folglich zu einer Frostschutzwarnung der Wärmepumpe führte. Als Konsequenz wurde die Entkopplung mit Hilfe der Ventile aufgehoben, wodurch passive Massenströme respektive Wärmeströme in den Erdwärmesonden aufgrund von Unstimmigkeiten in der Massenstrombilanz zwischen Erdwärmesonden und Wärmepumpe entstehen können. Dieser Umstand kann sehr gut in der Untersuchung der Betriebsmodus „Heizen“ in der kalten Periode gesehen werden (siehe Abb. 32). Bis zum 14.11.2012 ist nur die 380m lange Erdwärmesonde aktiviert. Dennoch werden konstant Massenströme durch die beiden kurzen Erdwärmesonden sowie durch die 300m lange Erdwärmesonde gedrückt. Im Verlaufe des 14.11. wird die 300m lange Erdwärmesonde aktiviert und die Massenströme durch die kurzen Erdwärmesonden kommen fast zum Stillstand. Schlussendlich hat sich allgemein gezeigt, dass die Komplexität der Hydraulik mit Schwierigkeiten behaftet ist.

Im Verlaufe der Messperiode wurden somit immer wieder Anpassungen in den Einstellungen des Systems vorgenommen, die nicht dokumentiert und aufgrund der Datenlage somit schwer nachvollziehbar sind. Dementsprechend besteht eine Diskrepanz zwischen dem theoretischen und realen Verhalten des B35. Des Weiteren traten immer wieder Probleme mit der Aufzeichnung der Daten der Mivune-Gebäudesteuerungssoftware auf, was schlussendlich zur Situation geführt hat, dass die ewz und HSLU-Daten als einzige Grundlage für die Auswertung verwendet werden konnten. Aufgrund der Komplexität des Systems ist jedoch für eine vollumfassende Analyse des Betriebsverhaltens eine vollständige Datenbasis notwendig. Das Messsystem der HSLU wurde für die Analyse der Hauptenergieströme ausgelegt und nicht für eine Detailanalyse. Es deckt somit nicht die ganze hydraulische Schaltung ab und infolgedessen wurden einige Details des Systems nicht erfasst. Als Beispiel wird die Situation um den Plattenwärmetauscher beim Hybridkollektor oder die Senkenseite der Wärmepumpen genannt.

Diskussion zu den Resultaten

Aus der Untersuchung der Energiebilanz des B35-Gebäudes ist hervorgegangen, dass für die Aufrechterhaltung des Komforts rund 82 kWh/m^2 EBF Wärmeenergie und für die Warmwassererwärmung rund 8 kWh/m^2 EBF benötigt wurde. Die Wärmepumpen bezogen $13.6 \text{ kWh}_{el}/\text{m}^2$ EBF. Die Berechnung laut SIA 380/1 weist einen Wert von $53 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ für den spezifischen Wärmebedarf und einen Wert von $17 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ für den Warmwasserbedarf auf. Es ist ersichtlich, dass für die Warmwasseraufbereitung weniger Energie verbraucht wurde. Dieser Umstand ist hauptsächlich auf den Unterschied zwischen der geplanten und der realen Belegung des Gebäudes zurückzuführen. Der relativ hohe Wärmeenergiebedarf ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Zum einen hat sich durch Erfahrungsberichte

der Anwohner sowie vereinzelt Überprüfungen der Raumsensoren gezeigt, dass die Raumtemperatur zum Teil bis zu 23 °C betragen hat anstelle von 20 °C nach SIA-Annahme. Einerseits ist dies auf die Komfortwünsche der Anwohner zurückzuführen. Andererseits hat sich gezeigt, dass die hydraulische Verschaltung der Verbraucherseite keine klare Entkoppelung der Heizkreisläufe ermöglicht hat. So wurde ein Teil der Wärme auch zu Wohnungen geführt, die keinen Wärmebedarf hatten. Dieser Effekt zeigt sich vor allem, wenn die Dachwohnung einen Heizbedarf aufweist. Dieser Umstand in Kombination mit der zonenbasierten Gebäudesteuerung begünstigt den kontinuierlichen Betrieb der Wärmepumpen, was sich auch in den Laufzeiten der Wärmepumpen widerspiegelt. Des Weiteren sind zum Teil Fehlfunktionen in der Gebäudesteuerung verantwortlich. Bei einem Absturz des Systems kann die Situation auftreten, dass Heizakkorde nicht beendet wurden, obwohl kein Heizbedarf mehr vorhanden war. Zudem hat sich gezeigt, dass für den Heizfall mit einer aktivierten Wärmepumpe die Vorlauftemperatur des Fussbodenregisters tiefer ausfällt als wenn zwei Wärmepumpen aktiviert sind (vgl. Abb. 28 und Abb. 29). Dies begünstigt ebenfalls eine längere Laufzeit aufgrund der geringeren Wärmeübertragungsrate.

Die Untersuchung hat weiterhin aufgezeigt, dass die Wärmeenergiebilanz der Quellenseite eine Diskrepanz aufweist. Während der Untersuchungsperiode wird durch die Wärmepumpen rund 10 kWh/m² EBF mehr Wärme aufgenommen als von den Energiequellen bezogen wird. Diese Differenz kann diverse Ursachen haben, die im Folgenden qualitativ behandelt werden. Die Heizkreisläufe des Gebäudes werden durch zwei Hauptleitungen versorgt. Das Gebäude ist somit in einen Nord- und einen Südteil aufgeteilt. Nach dem Einbau der Messsensoren musste festgestellt werden, dass der Temperaturfühler, welcher im Rücklauf der Fussbodenheizung installiert worden ist, lediglich in der Leitung für den Nordteil eingebaut worden ist. Der Südteil des Gebäudes ist stärkeren Schwankungen ausgesetzt. Somit wird ein gewisser Anteil der Wärmemenge, welche durch die passive Kühlung ins System eingetragen wird, nicht in die Bilanzierung mit einbezogen. Im Heizfall könnte dies wohlmöglich den Effekt haben, dass der Heizenergiebedarf leicht höher ausfällt. Es besteht des Weiteren die Hypothese, dass ein Anteil der Wärme von der Garage ins System eingetragen wird. Vereinzelt Messungen in der Garage haben gezeigt, dass von einer relativ konstanten Temperatur von rund 17 bis 18 °C ausgegangen werden kann. Während den Wintermonaten herrschen im hydraulischen System, das zu einem erheblichen Teil in der Garage installiert ist, Temperaturen zwischen 9 und 13 °C. Für die Leitungen sind Stahlrohre gewählt worden. Mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit von Stahl, den Dimensionen der Rohre und deren Länge kann anhand einer kurzen Berechnung aufgezeigt werden, dass beim vorherrschenden Temperaturunterschied ein Teil der Wärme von der Garage eingetragen werden kann. Mit anderen Worten kann die Garage als weitere passive Energiequelle interpretiert werden. Da jedoch die Diskrepanzen vor allem während der Uebergangszeiten auftraten, ist diese Hypothese eher nebensächlich. Eher ist sie begründet mit den Unsicherheiten der Erfassung der Wärmerückgewinnung der Fussbodenheizung, welche, wie weiter unten kommentiert, vermutlich ungenügend erfasst werden konnte. Die Differenz in der Wärmebilanz könnte zudem durch die Messunsicherheiten, insbesondere der Temperaturen der Wärmeversorgung verursacht werden. Diese bewegen sich in einem relativ kleinen Bereich und die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Komponenten sind zum Teil gering.

Wärmepumpe und Niedertemperatur-Heizsystem

Die Untersuchungen zur Wärmepumpe haben ergeben, dass die Laufzeit der Wärmepumpen überdurchschnittlich hoch ist. Dieser Umstand kommt sowohl durch ewz- wie auch durch die HSLU-Daten zum Vorschein und zeigt auf, dass noch ein erhebliches Optimierungspotential vorliegt. Der Grund für die vielen Betriebsstunden wurde bereits kurz bei der Diskussion um den Heizenergiebedarf angeschnitten. Zum einen ist die hydraulische Verschaltung der Heizkreisläufe verantwortlich. Die Verluste der Wärmeenergie an die unteren Wohnungen bei ausschliesslichem Heizenergiebedarf in der Dachwohnung hätten entweder mit Rückschlag- oder Stellventilen unterbunden werden können. Zum anderen ist

auch die Gebäudesteuerung in Kombination mit der Wahl von drei kleineren Wärmepumpen der Grund. Mit einer grossen Wärmepumpe mit 25kW Leistung und einer einfachen Zwei-Punkt-Regelung ist anzunehmen, dass die Betriebsstunden kleiner ausfallen würden. Welche Auswirkungen dies auf den elektrischen Energieverbrauch hätte, kann hier nicht beurteilt werden. Schlussendlich muss erwähnt werden, dass es aus konzeptioneller Sicht von hoher Relevanz war, eine Niederhub-Wärmepumpe im B35-Gebäude zu verwenden und unter realen Bedingungen zu testen. In dieser Hinsicht sind die erreichten COP's der Wärmepumpe interessant. Die Untersuchung hat gezeigt, dass sich der COP im Dezember 2012 zwischen 6 und 9 bewegt. Während der kältesten Periode im Februar 2012 wurde ein COP von 5.7 erreicht. Die Jahresarbeitszahl beträgt 6.66, inkl. der Warmwasser-aufbereitung. Das Ziel der Expedition „viaggiata“ einer Jahresarbeitszahl grösser als 6 wurde somit mit dem B35-Gebäude grundsätzlich erreicht. Des Weiteren stimmt der COP mit den Überlegungen zum Energiekonzept des B35 überein.

Nebst den wärmepumpenspezifischen Aspekten wie dem Gütegrad, zählt einerseits das Niedertemperatur-Heizsystem zu den wichtigen Elementen zur Erhöhung der Leistungszahl. Andererseits ist die Qualität der Anergiequellen, d.h. in erster Linie die Doppel-U-Rohr Erdwärmesonden, von grosser Bedeutung, wobei dieser Aspekt in der Diskussion zu den Erdwärmesonden besprochen wird. Die Erfahrungen der letzten zwei Jahre haben gezeigt, dass der Komfort im Gebäude mit dem eingebauten Fussbodenheizungssystem gewährleistet ist. Die Messungen verbildlichen, dass während der kältesten Periode mit einer Vorlauftemperatur von rund 28 °C geheizt wurde. Während der ganzen Untersuchungsperiode bewegt sich die Temperatur im Heizfall zwischen 26 und 32 °C. Des Weiteren dient das Fussbodenregister auch der passiver Kühlung. Es hat sich allerdings gezeigt, dass der erwartete Wärmegewinn von 20'000kWh nicht nachgewiesen werden konnte. Aufgrund der Datengrundlage können jedoch keine detaillierten Aussagen zu diesem Modus gemacht werden. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Rücklauftemperatur sowie die Wärmeströme aufgrund der Position des Temperatursensors nur einen Teil widerspiegeln. Dies ist auch in den Resultaten ersichtlich. So zeigt sich eine Diskrepanz zwischen der Kühlleistung und der in die Erdwärmesonden eingespeiste Leistung. Nichtsdestotrotz sind die Erfahrungen und die Resultate bezüglich der Fussbodenheizung als positiv zu bewerten.

Hybridkollektor

Bei der Planungsberechnung zum B35-Gebäude wurde von einem Wärmeertrag des Hybridkollektors von rund 14'000 kWh Wärme und rund 4'100 kWh Strom ausgegangen. Die gemessenen Werte betragen jedoch lediglich rund 7'400 kWh Wärme und rund 3'700 kWh Strom. Der Unterschied im elektrischen Ertrag kann mit den Fluktuationen der solaren Sonneneinstrahlung begründet werden. Es wurde zudem festgestellt, dass die elektrische Leistungsabgabe aufgrund einer teilweise auftretenden Verschattung durch ein Ablüftungsrohr beeinträchtigt werden kann. Die serielle elektrische Verschaltung von neun Hybridkollektoren bewirkt, dass im Falle der Beschattung eines Hybridkollektors einen starken Leistungsabfall aller neun Hybridkollektoren eintritt.

Weiterhin wurde erwartet, dass mit der eigenen Hybridkollektoranlage der Stromverbrauch der Wärmepumpe und der Lüftung gedeckt werden können. Die Resultate zeigen, dass dies noch nicht erreicht wurde. Der Verbrauch der Wärmepumpe kann selbst mit der geplanten Verdoppelung der Hybridkollektorfläche auf 60 m² nicht gedeckt werden. Allerdings könnte bei einer Optimierung der Wärmepumpenlaufzeit der Stromverbrauch noch gesenkt werden.

Beim Wärmeertrag zeigt sich ein erheblicher Unterschied zwischen Plan- und Sollwert. Mit einem Ertrag von 234 kWh/m²a wurde etwa die Hälfte des Planwertes erreicht. Zum einen muss erwähnt werden, dass der Planwert eine erste Einschätzung repräsentiert und mit rund 470 kWh/m²a relativ hoch angesetzt war. Spätere Einschätzungen gehen eher von einem Wert zwischen 300 und 350 kWh/m²a aus. Ein weiterer Grund liegt darin, dass es sich beim installierten Hybridkollektor um einen Prototypen handelt. So wurde festgestellt, dass sich die

Absorberplatte des Hybridkollektors leicht gelöst hatte, wodurch sich die thermische Effizienz reduziert hat. Zudem ist die B35-Hybridkollektoranlage die erste installierte Anlage und hat somit auch was die hydraulische Verschaltung angeht Experimentalcharakter. Hydraulisch wurden sechs Hybridkollektoren seriell verschaltet. Nach heutigem Wissensstand wird eine parallele Verschaltung der Kollektoren priorisiert. Es besteht nun die Möglichkeit, dass das Temperaturniveau bereits nach zwei bis drei Kollektoren relativ hoch ist und somit die Leistung pro weiterem Kollektor sukzessive abfällt. Es wird darauf aufmerksam gemacht, dass es sich bei den Resultaten zur Leistung des Hybridkollektors um Mittelwerte für das gesamte Hybridkollektorfeld handelt und keine Rückschlüsse zum Leistungsverhalten eines einzelnen Hybridkollektors gezogen werden können. Für eine Abklärung der Auswirkungen müssten Temperatursensoren an jedem Rücklauf installiert werden. Nichtsdestotrotz zeigt der Hybridkollektor bei hoher Solareinstrahlung eine beachtliche thermische Leistung. So zeigt sich während der Untersuchungsperiode zur Regeneration, dass zur Spitzenzeit (Mittag) eine Leistung von rund $300\text{-}350 \text{ W/m}^2 A_{\text{HK}}$ bei einer Solarstrahlung von ca. 800 W/m^2 erreicht wird. Somit weist der Hybridkollektor eine thermische Effizienz von rund $0.38\text{-}0.44$ auf. Schlussendlich ist der Wärmeertrag des Hybridkollektors von den Betriebseinstellungen und von der Gebäudesteuerung mit den definierten Sollwerten abhängig. Es hat sich gezeigt, dass Rücklauftemperaturen von bis zu $40 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht worden sind. Bei den Überlegungen zum LowEx-Konzept wurde von Temperaturen von durchschnittlich $25\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgegangen. Somit kann der Schluss gezogen werden, dass noch Optimierungspotential für die Einbindung des Hybridkollektors ins Gesamtsystem vorhanden ist. Idealerweise würde eine leistungsabhängige Steuerung des Massenstroms implementiert werden.

Erdwärmesonde

Die Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonden des B35 sind die wichtigsten Energiequellen und essentiell für das ZE-LowEx-Konzept. Bei den meisten Betriebsakkorden spielen sie eine wichtige Rolle. Grundsätzlich zeigt die Energiebilanz der Erdwärmesonden, dass mehr Wärme entzogen worden ist, als durch die Regeneration und Passive Kühlung bereit gestellt worden ist. Die Erdwärmesonden wurden gesamthaft zu 28% regeneriert. Werden die einzelnen Erdwärmesonden betrachtet, zeigt sich, dass die kurzen Erdwärmesonden eine bessere Bilanz aufweisen. So werden die kurzen Erdwärmesonden zu 38% und die langen Erdwärmesonden zu 20% (380m EWS) und zu 33% (300m EWS) regeneriert. Der Unterschied bei den langen EWS ist einerseits auf die unterschiedliche Tiefe zurückzuführen. Der absolute Energieeintrag ist nämlich für beide EWS gleich hoch. Andererseits gründet die Differenz in der stärkeren Belastung der 380m lange EWS aufgrund der Gebäudesteuerung. Im Heizakkord H1 sollte nämlich nur diese Erdwärmesonde genutzt werden.

Die Ergebnisse zur Regeneration der langen EWS sind weniger überraschend, da erst die Hälfte der benötigten Hybridkollektorfläche installiert ist und somit schon klar war, dass die vollständige Regeneration nicht möglich ist. Zudem hat sich beim Heizenergiebedarf gezeigt, dass mehr Wärme benötigt wird als ursprünglich berechnet. Des Weiteren haben die Untersuchungen zu den verschiedenen Betriebsmodi gezeigt, dass oft undurchsichtige Situationen hinsichtlich der hydraulischen Situation vorkommen können. Die Betriebsmodi „Passives Kühlen und Regeneration“ können gleichzeitig auftreten und es muss angenommen werden, dass gewisse Vermischungen stattfinden und sich somit die Qualität der Regenerationswärme vermindert. Dies zeigt sich zum einen in der Diskrepanz zwischen der Hybridkollektorleistung und der in die EWS eingetragene Leistung. Des Weiteren lässt die aus der Vorlauftemperatur von durchschnittlich $21.4 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einer durchschnittlichen Rücklauftemperatur des Hybridkollektors von $32.1 \text{ }^\circ\text{C}$ schliessen, dass eine hydraulische Vermischung stattfindet. Es kann aber keine hundertprozentige Aussage gemacht werden, da v.a. die Situation am Plattenwärmetauscher nicht analysiert werden kann. Nichtsdestotrotz zeigt sich, dass zu Zeiten mit starker Solareinstrahlung die langen Erdwärmesonden mit ca. $25 \text{ }^\circ\text{C}$ regeneriert werden können. Dies entspricht etwa der durch das ZE-LowEx-Konzept erwarteten Regenerationstemperatur.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die instantane Entzugs- und Regenerationsleistung. Die Auswertung der Messdaten hat gezeigt, dass im Heizbetrieb der Löwenanteil der Wärme aus den langen Erdwärmesonden kommt. Es zeigt sich erneut, dass die kurzen Erdwärmesonden „passiv“, also ohne aktiven Massenstrom, für die Bereitstellung der Raumwärme beansprucht werden, obwohl aufgrund der Gebäudesteuerung dieser Fall nur selten auftreten sollte. Des Weiteren kann gesagt werden, dass die Entzugsleistung während der Untersuchungsperiode den Planwert von 50W/m nie überschreitet.

Die Resultate zur Untersuchung der Heizfälle zeigen, dass die Zieltemperatur von 15 °C für den Rücklauf der Erdwärmesonden nicht erreicht werden konnte. Es wird vermutet, dass in den langen Erdwärmesonden die Wärme verschmiert wird. Ein Teil der Wärme wird von den unteren Gesteinsschichten in die oberen Gesteinsschichten übertragen, wodurch sich die Qualität der Wärme reduziert. Ein anderer Grund liegt in der Hydraulik. Die Vermischung der Massenströme von den kurzen und langen Erdwärmesonden führt zur Reduktion der Temperatur. So wird während der kältesten Periode eine Vorlauftemperatur für die Wärmepumpen von ca. 10 °C erreicht, obwohl die Rücklauftemperatur der 380m langen Erdwärmesonde rund 13 °C beträgt. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass nach dem Sommer die Rücklauftemperaturen leicht gestiegen sind. Somit kann angenommen werden, dass die Regeneration einen Effekt auf die Temperatur hat. Nichtsdestotrotz muss erkannt werden, dass beim Wärmeeintrag ein Teil in den oberen Gesteinsschichten „verloren“ geht.

Schlüsselerkenntnisse

Die Erfahrungen, welche mit dem B35 gemacht wurden, zeigen auf, dass die grundsätzlichen Ideen und Auslegungen des ZE-LowEx-Konzepts in die richtige Richtung zielen. Basierend auf den Beobachtungen im Betrieb und den Messdaten konnten wichtige Erkenntnisse zu den eingesetzten Technologien und zur Interaktion des Gesamtsystems gewonnen werden. Die Haupterkenntnisse können in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

Das Ziel der Nutzung möglichst aller Energieströme im Gebäude hat zu einem erheblichen Anstieg der Komplexität des Gesamtsystems geführt. Dies ist zum Teil auch auf die verwendeten Technologien sowie die Art und Weise der Implementierung zurückzuführen. Die gewonnenen Erkenntnisse haben zum Ausdruck gebracht, dass eine **grundsätzliche Vereinfachung des Systems** vorgenommen werden muss. Mit dem B35-Gebäude wurde erkannt, dass vor allem die **Hydraulik** zu kompliziert aufgebaut worden ist. In verschiedenen Betriebszuständen kam es zu Vermischungen der verschiedenen Wärmeströme, was schlussendlich zu Ineffizienzen führte. In diesem Zusammenhang musste eine Gebäudeautomation angewendet werden, die dieser Komplexität gerecht wird. Im Betrieb hat sich gezeigt, dass die Gebäudesteuerung fehleranfällig ist und regelmässig Anpassungen getätigt werden mussten. Konsequenterweise musste erkannt werden, dass auch die **Gebäudesteuerung** vereinfacht werden muss.

Ein weiterer Umstand, der das System vereinfacht, ist die Erkenntnis, dass auf die **Wärmerückgewinnung aus der Abluft** verzichtet werden kann. Für die Einbindung der Wärme in den hydraulischen Kreislauf wird ein Plattenwärmetauscher benötigt. Die Verluste im PWT reduziert die erreichbare Temperatur, so dass sie im Vergleich zur Erdwärmesonde nur im Winter eine höhere Qualität aufweist. Zudem ist die Abluftwärmerückgewinnung nicht ganztägig im Betrieb, wodurch sich die potenziellen Erträge reduzieren und was schlussendlich auch aus finanzieller Sicht dazu führt, dass die Wärmerückgewinnung weggelassen werden kann.

Anhand des B35 konnte weiterhin bestätigt werden, dass eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen von grösser als sechs erreicht werden kann. Die Resultate zeigen aber auch auf, dass für Temperaturhübe unter 25K der Gütegrad zu niedrig ist. Für die weitere Verbesserung der JAZ müssen weitere Fortschritte in der Wärmepumpentechnologie angestrebt werden.

Die Messungen hinsichtlich des **Erdwärmespeichers** haben ergeben, dass Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonden bei der angestrebten Tiefe nicht zielführend sind. Zum einen ist der Druckverlust sehr gross was zu einem erhöhten Strombedarf bei den Umwälzpumpen führt. Die wichtigste Erkenntnis ist jedoch die auftretende Verschmierung innerhalb der Erdwärmesonden. Es hat sich gezeigt, dass die Wärme beim Aufstieg in die oberen Gesteinsschichten getragen wird und folglich tiefere Rücklauftemperaturen eintreten als aufgrund der Erdreichtemperatur erwartet werden konnte. Zudem wurde erkannt, dass die Regeneration aufgrund des zu geringen geothermischen Energieflusses zwingend notwendig ist, damit eine Auskühlung des Erdreichs verhindert werden kann.

Literatur

Bafu, 2013. Bundesamt für Umwelt, <http://www.bafu.admin.ch/index.html?lang=de>, [eingesehen 29.06.2013].

HSLU, 2012. „Kurzbedienung Datenerfassung.pptx“, Internes Dokument, Luzern. Switzerland.

Leibundgut H., 2012. „Low Ex building design“, Zürich, Switzerland.

Glossar

Abkürzungen

LowEx	Low Exergy
EBF	Energiebezugsfläche
EWS	Erdwärmesonde
HK	Hybridkollektor
FBH	Fussbodenregister/ Fussbodenheizung
RW	Raumwärme
WW	Warmwasser
WWSp	Warmwasserspeicher
REG	Regeneration
WP1	Wärmepumpe Warmwasser
WP2, WP3	Wärmepumpe Raumwärme
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
AZ/JAZ	Arbeitszahl / Jahresarbeitszahl
PE	Primärenergie
NE	Nicht erneuerbare Energie
THG	Treibhausgas

Formelzeichen

E_{el}	[kWh]	Elektrische Energie
E_{th}	[kWh]	Thermische Energie
P	[W]	Elektrische Leistung
Q	[W]	Thermische Leistung Wärmestrom
t	[h]	Zeit
T	[°C]	Temperatur
ΔT	[K]	Temperaturhub / Temperaturspreizung
M	[kg/h]	Massenstrom
A	[m ²]	Fläche

Anhang

Kalibration B35: Sensor T101 - T118

Zusammenfassung Kalibration Messfühler T101 ... T118 Projekt B35

Referenzsensor 1.01HP023

Zeit T_REF B35 Data Acquisition Log-File

dd.mm.yy hh.mm.ss	°C	T101	T102	T103	T104	T105	T106	T107	T108	T109	T110	T111	T112	T113	T114	T115	T116	T117	T118
Messpunkt 0°C																			
Mittelwert	-0.01	-0.07	-0.04	0.00	0.04	0.00	-0.03	-0.02	0.00	0.00	0.00	-0.05	-0.01	-0.05	0.03	0.00	0.09	0.00	0.00
Standardabweichung (STABW.S)	0.01	0.05	0.05	0.02	0.05	0.02	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.05	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00
Abweichung von Referenz	0.00	-0.05	-0.02	0.02	0.06	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	-0.04	0.00	-0.04	0.04	0.02	0.10	0.01	0.01
Messpunkt 20°C																			
Mittelwert	20.01	20.10	20.10	20.20	20.20	20.15	20.10	20.10	20.11	20.12	20.12	20.09	20.10	20.10	20.20	20.19	20.20	20.10	20.10
Standardabweichung (STABW.S)	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02
Abweichung von Referenz	0.00	0.09	0.09	0.19	0.19	0.14	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.08	0.09	0.09	0.19	0.18	0.19	0.09	0.09
Messpunkt 40°C																			
Mittelwert	39.88	40.00	40.00	40.10	40.10	40.10	40.00	40.01	40.10	40.10	40.10	40.00	40.00	40.00	40.10	40.10	40.10	40.00	40.00
Standardabweichung (STABW.S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abweichung von Referenz	0.00	0.12	0.12	0.22	0.22	0.22	0.12	0.13	0.22	0.22	0.22	0.12	0.12	0.12	0.22	0.22	0.22	0.12	0.12
Messpunkt 60°C																			
Mittelwert	59.82	59.96	59.96	60.04	60.06	60.10	60.00	60.02	60.05	60.03	60.05	60.00	60.00	60.00	60.09	60.08	60.10	60.00	60.00
Standardabweichung (STABW.S)	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.02	0.04	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.00	0.02	0.00
Abweichung von Referenz	0.00	0.15	0.14	0.22	0.24	0.28	0.18	0.20	0.23	0.21	0.23	0.18	0.18	0.18	0.27	0.26	0.28	0.18	0.18
σ_z Maximalwert Standardabweichung Messreihe		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02
σ_{REF} Maximalwert Abweichung von Referenz		0.15	0.14	0.22	0.24	0.28	0.18	0.20	0.23	0.22	0.23	0.18	0.18	0.18	0.27	0.26	0.28	0.18	0.18
Messunsicherheit Referenzgerät 1.01HP023 aus Kalibration	0.03																		
$\sigma_{REF} + \sigma_z$ Gesamte Messunsicherheit $\pm^\circ\text{C}$		0.16	0.15	0.23	0.25	0.29	0.19	0.21	0.24	0.23	0.24	0.19	0.18	0.19	0.27	0.27	0.29	0.18	0.18

Datum der Kalibration:

28.04.2011 13:24:29

Ham

Kalibration B35: Sensor T129 - T140

Zusammenfassung Kalibration Messfühler T129 ... T140 Projekt B35

Pro Messpunkt wurden 30 Einzelmessungen durchgeführt

Referenzsensor 1.01HP023

Zeit

T_REF B35 Data Aquisition Log-File

dd.mm.yy hh.mm.ss	°C	T129	T130	T131	T132	T133	T134	T135	T136	T137	T138	T139	T140
Messpunkt 0°C													
Mittelwert	-0.09	-0.10	-0.07	-0.10	-0.10	-0.10	-0.06	-0.10	-0.10	-0.01	-0.08	-0.10	-0.10
Standardabweichung (STABW.S)	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00
Abweichung von Referenz	0.00	-0.01	0.02	-0.01	-0.01	-0.01	0.03	-0.01	-0.01	0.08	0.01	-0.01	-0.01
Messpunkt 20°C													
Mittelwert	19.89	20.00	20.03	20.00	20.00	19.95	20.00	19.97	19.90	20.00	20.00	19.98	20.00
Standardabweichung (STABW.S)	0.00	0.02	0.05	0.00	0.02	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02
Abweichung von Referenz	0.00	0.11	0.14	0.11	0.11	0.06	0.11	0.08	0.01	0.11	0.11	0.09	0.11
Messpunkt 40°C													
Mittelwert	39.97	40.16	40.19	40.11	40.15	40.10	40.18	40.10	40.09	40.10	40.10	40.10	40.10
Standardabweichung (STABW.S)	0.00	0.05	0.03	0.03	0.05	0.00	0.04	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00
Abweichung von Referenz	0.00	0.19	0.22	0.14	0.18	0.13	0.21	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13
Messpunkt 60°C													
Mittelwert	59.97	60.20	60.20	60.20	60.20	60.20	60.20	60.19	60.10	60.10	60.11	60.11	60.10
Standardabweichung (STABW.S)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00
Abweichung von Referenz	0.00	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.13	0.13	0.14	0.15	0.13
σ_z Maximalwert Standardabweichung Messreihe		0.05	0.05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02
σ_{REF} Maximalwert Abweichung von Referenz		0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.13	0.13	0.14	0.15	0.13
Messunsicherheit Referenzgerät 1.01HP023 aus Kalibration	0.03												
$\sigma_{REF} + \sigma_z$ Gesamte Messunsicherheit $\pm^\circ\text{C}$		0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.14	0.14	0.15	0.16	0.14

Datum der Kalibration:

10.05.2011 10:21:26

Ham

Kanaltabelle B35 (1)

SAIA PCD Konfiguration

MasterStation	Typ	Basis-Adresse	Media Mapping Register IO Register	Media Mapping Register	Symbol Name		
192.168.1.100				Output StatusFlag			
RIO1 Hauptstation	192.168.1.101						
Modul1	PCD3.W745	0	0	0	PCD1.M1_K1	T101	0 Rücklauf Erdsonde 1.1
					PCD1.M1_K2	T102	1 Vorlauf Erdsonde 1.1
					PCD1.M1_K3	T103	2 Rücklauf Erdsonde 1.2
					PCD1.M1_K4	T104	3 Vorlauf Erdsonde 1.2
	PCD3.W745	16	16	32	PCD1.M2_K1	T105	4 Rücklauf Erdsonde 2.1
					PCD1.M2_K2	T106	5 Vorlauf Erdsonde 2.1
					PCD1.M2_K3	T107	6 Rücklauf Erdsonde 2.2
					PCD1.M2_K4	T108	7 Vorlauf Erdsonde 2.2
	PCD3.W745	32	32	64	PCD1.M3_K1	T109	8 Sondenaustritt WP1
					PCD1.M3_K2	T110	9 Sondeneintritt WP1
					PCD1.M3_K3	T111	10 Sondenaustritt WP2
					PCD1.M3_K4	T112	11 Sondeneintritt WP2
	PCD3.W745	48	48	96	PCD1.M4_K1	T113	12 Sondenaustritt WP3
					PCD1.M4_K2	T114	13 Sondeneintritt WP3
					PCD1.M4_K3	T115	14 Eintritt WW Speicher
					PCD1.M4_K4	T116	15 Austritt WW Speicher
	PCD3.W745	64	64	128	PCD1.M5_K1	T117	16 Vorlauf Bodenheizung
					PCD1.M5_K2	T118	17 Rücklauf Bodenheizung
					PCD1.M5_K3	T119	18
					PCD1.M5_K4	T120	19
	PCD3.W745	80	80	160	PCD1.M6_K1	T121	20
					PCD1.M6_K2	T122	21
					PCD1.M6_K3	T123	22
					PCD1.M6_K4	T124	23
	PCD3.W745	96	96	192	PCD1.M7_K1	T125	24
					PCD1.M7_K2	T126	25
					PCD1.M7_K3	T127	26
					PCD1.M7_K4	T128	27 Gehäusetemperatur Station Keller
	PCD3.H114	112	112		PCD1.M8_K1	C201	Durchfluss Erdsonde 1.1
					PCD1.M8_K2	C202	Durchfluss Erdsonde 1.2
					PCD1.M8_K3	C203	Durchfluss Erdsonde 2.1
					PCD1.M8_K4	C204	Durchfluss Erdsonde 2.2
	PCD3.H114	128	128		PCD1.M9_K1	C205	Durchfluss WP1
					PCD1.M9_K2	C206	Durchfluss WP2
					PCD1.M9_K3	C207	Durchfluss WP3
					PCD1.M9_K4	C208	Durchfluss WW Speicher
	PCD3.H114	144	144		PCD1.M10_K1	C209	Durchfluss Bodenheizung
					PCD1.M10_K2	C210	
					PCD1.M10_K3	C211	
					PCD1.M10_K4	C212	
	PCD3.W340	160	160		PCD1.M11_K1	U301	28

Kanaltabelle B35 (2)

					PCD1.M11_K2	U302	29	
					PCD1.M11_K3	U303	30	
					PCD1.M11_K4	U304	31	
					PCD1.M11_K5	U305	32	
					PCD1.M11_K6	U306	33	
					PCD1.M11_K7	U307	34	
					PCD1.M11_K8	U308	35	SR0035
RIO2_Dach	192.168.1.102							
	Modul1	PCD3.W745	0		0	PCD2.M1_K1	T129	0 Vorlauf Hybridfeld
						PCD2.M1_K2	T130	1 Rücklauf Hybridfeld
						PCD2.M1_K3	T131	2 Vorlauf Abluft WRG
						PCD2.M1_K4	T132	3 Rücklauf Abluft WRG
		PCD3.W745	16		32	PCD2.M2_K1	T133	4 Temperatur Hybridfeld1
						PCD2.M2_K2	T134	5 Temperatur Hybridfeld2
						PCD2.M2_K3	T135	6 Temperatur Hybridfeld3
						PCD2.M2_K4	T136	7 Temperatur Hybridfeld4
		PCD3.W745	32		64	PCD2.M3_K1	T137	8 Temperatur Hybridfeld5
						PCD2.M3_K2	T138	9 Temperatur Hybridfeld6
						PCD2.M3_K3	T139	10 Temperatur Hybridfeld7
						PCD2.M3_K4	T140	11 Temperatur Umgebung
		PCD3.W745	48		96	PCD2.M4_K1	T141	12
						PCD2.M4_K2	T142	13
						PCD2.M4_K3	T143	14
						PCD2.M4_K4	T144	15
		PCD3.W745	64		128	PCD2.M5_K1	T145	16
						PCD2.M5_K2	T146	17
						PCD2.M5_K3	T147	18
						PCD2.M5_K4	T148	19 Gehäusetemperatur Dachstation
		PCD3.H114	80	580		PCD2.M6_K1	C221	Durchfluss Hybridfeld 1
						PCD2.M6_K2	C222	Durchfluss Abluft WRG
						PCD2.M6_K3	C223	
						PCD2.M6_K4	C224	
		PCD3.W340	96	596		PCD2.M7_K1	U309	20 Strahlung Pyranometer
						PCD2.M7_K2	U310	21
						PCD2.M7_K3	U311	22
						PCD2.M7_K4	U312	23
						PCD2.M7_K5	U313	24
						PCD2.M7_K6	U314	25
						PCD2.M7_K7	U315	26
						PCD2.M7_K8	U316	27
		PCD3.A200	112		0			

Messstellen

Messstellen B35 gemäss Prinzipschema Stand 24.09.2010, Handergänzung 7-10-2010, erhalten am 22.12.2010

Zentrale

Position	Leitung Dimension	Durchfluss m3/h	Zähler Fabrikat	Typ	Impuls lt/Imp	kvs-Wert m3/h	Anschluss Dimension	Druckverlust mbar
Sonde S 1.1	5/4"	1.8	GWF	MTW	2.5	10	G 5/4"	32.4
Sonde S 1.2	5/4"	1.65	GWF	MTW	2.5	10	G 5/4"	27.2
Sonde S 2.1	5/4"	1.8	GWF	MTW	2.5	10	G 5/4"	32.4
Sonde S 2.2	5/4"	1.75	GWF	MTW	2.5	10	G 5/4"	30.6
WP 1	42.4/37.2	1.25	GWF	MTW	2.5	10	G 5/4"	15.6
WP 2	42.4/37.2	1.25	GWF	MTW	2.5	10	G 5/4"	15.6
WP 3	42.4/37.2	1.25	GWF	MTW	2.5	10	G 5/4"	15.6
WW-Speicher	42.4/37.2	1.94	GWF	MTW	2.5	10	G 5/4"	37.6
Bodenheizung	60.3/55.7	5.82	GWF	MTW	2.5	20	G 2"	84.7

Dach

Hybridkollektor	3/4" SDR111	0.96	GWF	MTW	2.5	5	G 1"	36.9
Abluftkühler	3/4" SDR113	0.96	GWF	MTW	2.5	5	G 1"	36.9
Aussenluftfühler			GWF	Pt100				
Pyranometer			Hänny	Solar 130	1kW/m2=100mV			
Hybridfeld			GWF	Pt100				

Wärmeenergiebilanz Quellenseite, Lastseite und Elektrische Energiebilanz

Wärmeenergiebilanz der Quellenseite für die Periode Feb '12 bis Jan '13

[kWh]	Feb '12	Mrz '12	Apr '12	Mai '12	Jun '12	Jul '12	Aug '12	Sep '12	Okt '12	Nov '12	Dez '12	Jan '13	Periode
EWS Total	8886	2976	2235	-1572	-2161	-2015	-2928	-778	3219	5960	8525	9675	32022
<i>out</i>	8886	3456	2835	480	240	100	120	700	3619	5960	8525	9675	44596
<i>in</i>		-480	-600	-2052	-2401	-2115	-3048	-1478	-400				-12574
<i>EWS1.1 150m</i>	1358	540	380	-28	-223	-675	-982	82	494	722	1081	1517	4265
<i>EWS1.2 380m</i>	3750	1408	1087	-804	-895	-325	-510	-421	1663	3050	4047	3981	16032
<i>EWS2.1 150m</i>	1207	330	413	-29	-214	-545	-842	33	466	694	1024	1363	3899
<i>EWS2.2 300m</i>	2571	698	355	-711	-829	-470	-594	-472	596	1494	2373	2814	7826
HK-Ertrag	142	583	472	991	1142	1308	1513	673	271	144	11	124	7373
FBH-Ertrag (Kühlen)	0	57	217	804	1056	663	1129	594	192	0	0	0	4863
Ertrag Total	9028	3616	2924	223	37	-44	-286	489	3682	6104	8536	9799	44258
WP's Wärmebezug	-9238	-3825	-4394	-1624	-782	-307	-378	-1857	-4325	-6198	-8874	-10182	-51985
<i>WP1 in</i>	-372	-383	-353	-332	-309	-307	-378	-527	-524	-577	-1953	-2452	-8466
<i>WP2 in</i>	-4415	-2626	-3449	-1292	-474	0	0	-1330	-3096	-4515	-4853	-4777	-30826
<i>WP3 in</i>	-4452	-816	-591	0	0	0	0	0	-706	-1107	-2069	-2952	-12693
Energiebilanz	-210	-208	-1470	-1401	-746	-351	-664	-1368	-645	-95	-264	-305	-7727

Wärmeenergiebedarf Heizen und Warmwasser für die Periode Feb '12 bis Jan '13

[kWh]	Feb '12	Mrz '12	Apr '12	Mai '12	Jun '12	Jul '12	Aug '12	Sep '12	Okt '12	Nov '12	Dez '12	Jan '13	Periode
FBH	10960	4917	3872	1013	642	595	601	1415	5043	7606	11938	13599	62202
WW	425	440	406	377	348	351	438	614	596	681	652	802	6129
Total Wärmebedarf	11385	5357	4277	1390	990	947	1039	2029	5639	8287	12590	14400	68331

Elektrische Energiebilanz für die Periode Feb '12 bis Jan '13

[kWh]	Feb '12	Mrz '12	Apr '12	Mai '12	Jun '12	Jul '12	Aug '12	Sep '12	Okt '12	Nov '12	Dez '12	Jan '13	Periode
Allg. Stromzähler	900	762	816	866	891	794	839	802	812	845	910	957	10194
WP	1764	721	767	325	209	147	161	365	788	1138	1795	2083	10265
Total Strombezug	2664	1483	1583	1191	1101	941	1000	1168	1599	1983	2705	3040	20458
HK-Ertrag	128	391	355	544	509	512	516	315	178	115	50	72	3684