



weil du
wertvoll bist!

Gefördert durch den
Innovationsfonds
Klima- und Wasserschutz

badenova
Energie. Tag für Tag

Freie Christliche Schule

Projekt 2012-8

Projekttitlel

CO₂ freier Schulanbau

Abschlussbericht



Ansprechpartner/Autor: Erich Schrank
Unterstützt durch: Paul Frener (Energie Global)

Erstellungsdatum April 2017

Inhalt

1	<i>Projektüberblick</i>	3
1.1	Ausgangslage	3
1.2	Wissenschaftliche und technische Ziele	3
1.3	Herausforderungen // Chancen und Risiken des Vorhabens	3
2	<i>Projektbeschreibung</i>	4
2.1	Projektablauf	4
2.1.1	Projektidee	4
2.1.2	Budgetplanung und Förderung	6
2.2	Projektplanung	6
2.2.1	Energiekonzept und Studien	6
2.2.2	Ausführungsplanung	7
2.3	Technische Umsetzung	7
2.3.1	Technische Daten und Anlagenbau	7
2.3.2	Schemata und Pläne	11
2.4	Anlagenbetrieb	11
2.4.1	Auswertung der Betriebsergebnisse	12
2.4.2	Bilanz nach 4 Jahren Betrieb	14
2.4.3	Aufgetretene Störungen	18
2.5	Ökologischer Nutzen	23
2.6	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit	23
2.6.1	Investitionskosten	23
2.6.2	Verbesserung der Wirtschaftlichkeit	23
3	<i>Wirkung der Umsetzung</i>	23
3.1	Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb	23
3.2	Weiterführende, resultierende Maßnahmen	24
3.3	Übertragbarkeit der Projektergebnisse	24
4	<i>Öffentlichkeitsarbeit</i>	24
4.1	Führungen und Vorträge	24
4.1.1	Führungen durchs Schulgebäude	24
4.2	Flyer, Presse, Veröffentlichungen	27
5	<i>Ausblick (Gedanken)</i>	27
6	<i>Darstellung drei wesentlicher Erkenntnisse aus dem Projekt.</i>	28

1 Projektüberblick

1.1 Ausgangslage

Die Freie Christliche Schule (FCS) Freiburg im Stadtteil Landwasser hat ihr Schulgebäude mit einem Anbau erweitert und dafür ca. 3 Millionen Euro investiert. Gebaut wurde ein dreistöckiges Gebäude (Erdgeschoss und zwei Obergeschosse), angeflanscht an die Südostseite des Hauptgebäudes. Der Erweiterungsbau hat eine Fläche von ca. 1500 m² und wurde in Massivbauweise erstellt.

Das Motto der Schule „weil du wertvoll bist“ und die christliche Orientierung waren Verpflichtung, nicht nur nach gesetzlichen Mindestvorgaben zu bauen, sondern darüber nachzudenken wie ein energetisch sparsames Gebäude mit einer effizienten und möglichst klimaneutralen Energieversorgung gebaut werden kann.

Die Installation der Gebäudetechnik wurde dabei bewusst offen gestaltet und nicht hinter abgehängten Decken versteckt um den Schülerinnen und Schüler somit auch ganz praktische Möglichkeiten zu Anknüpfungspunkte an die Technik zu bieten. Sie sollten dadurch positive Impulse erfahren, dass hochtechnologische Bauteile nicht unnahbar und wie von Zauberhand geführt funktionieren, sondern durchaus begreifbar und im alltäglichen Leben anschaulich sind.

1.2 Wissenschaftliche und technische Ziele

Es sollte erarbeitet werden, ob es möglich wäre eine nahezu „CO₂-emissionsfreie“ Schule zu bauen. Dabei stand nicht im Vordergrund das Ziel unter allen Umständen zu erreichen, sondern abzuwägen mit welchen innovativen Ideen die Kosten für ein solches Vorhaben so verringert werden konnten, dass es die Investitionsmöglichkeiten des Trägervereins der Schule (ein 1991 gegründeter Elternverein mit ca. 25 Mitgliedern) nicht übersteigen würde.

Es sollte also ein Mittelweg gefunden werden zwischen dem Einsatz von verfügbarer, bewährter und sparsamer Technik einerseits und Effizienz im Sinne des Kosten-Nutzen Verhältnis andererseits. Das Verbindungsglied dazu sollten ein paar besondere Ideen sein.

Die gesamte Schule (Klassenzimmer, Office-Bereich, Mensa, Flure und Mehrzweckraum) sollten neben der Wärmeversorgung auch mit ausreichend Frischluft versorgt werden.

1.3 Herausforderungen // Chancen und Risiken des Vorhabens

Ursprünglich war angedacht, die komplette Realisierung des neu geplanten Gebäudes an einen Generalunternehmer zu vergeben. Erst durch die Beschäftigung mit der Erarbeitung der zu definierenden Ziele, die dem GU ja auch vorgegeben werden musste, wurde die Komplexität der Aufgabe deutlich. Nachdem dann vom GU die Mehrkosten für die Projektidee auf dem Tisch lagen, war klar, dass es deutlich günstiger realisiert werden müsste, was wiederum nur so machbar war, indem wir diesen hochtechnischen Teil in Eigenverantwortung planen und ausführen würden.

Eine der größeren Herausforderung während der Planung und auch während der Umsetzungsphase war die Definitionen der Schnittstellen bzw. Abgrenzungen zum GU im Vorfeld so zu beschreiben,

dass das ganze Projekt eine Chance hatte ohne Zeitverlust durchgeführt werden zu können um Mehrkosten zu vermeiden.

Einen herben Rückschlag mussten wir dann durch die Entscheidung des Umweltschutzamtes hinnehmen, da wir mit dem Erdkollektor nicht tiefer als direkt unter die Bodenplatte in Untergrund gehen durften. Unser ursprüngliches Ziel war es, zumindest in die wasserführenden Schichten einlegen zu können, da dort die Temperaturkonstanz vergleichsweise hoch gewesen wäre. Im Winter würde eine konstante Temperatur von 8-12°C dauerhaft ausreichend Wärme bringen und im Sommer würde diese konstante Temperatur wiederum ausreichend Energiepotential für die Kühlung bieten. Leider wurde das, aus welchen Gründen auch immer, nicht genehmigt, obwohl wir im Primärkreislauf des Erdkollektors den „Wärmetransport“ mit frostschutzfreien Wasser realisiert hatten. Somit stand bzw. steht für die Vorwärmung leider nur eine sehr begrenzte Energiemenge zur Verfügung. Für das „Bonbon“ der Sommerkühlung gilt natürlich das gleiche.

2 Projektbeschreibung

Das Innovative des Projektes ist die optimale Vernetzung von erprobten und vorhandenen Komponenten zur Verbrauchsreduzierung, Effizienzsteigerung und die Nutzung von erneuerbaren Energieträgern und deren optimalen Ausnutzung in der Liegenschaft. Auch die vielen planerischen Ideen, die die Effizienz erhöhen und den bedarfsgerechten Betrieb gewährleisten, haben einen innovativen Charakter.

2.1 Projektablauf

2.1.1 Projektidee

2.1.1.1 *Verbrauchsreduzierung durch Dämmung*

Eine Erkenntnis war, dass Energie die nicht verloren geht auch nicht wieder eingebracht werden muss. So entschieden wir uns für einen deutlich besseren Wärmeschutz der Gebäudehülle. Dabei wurden dem GU folgende Sollwerte vorgegeben (Außenwände U-Wert 0,2 W/K m², Holz-Alu-Fenster U-Wert 1,0 W/K m²). Der Gedanke der Nachhaltigkeit fand dabei auch in der Auswahl der Holz-Alu-Fenster statt, die eine besonders lange Lebenszeit und geringe Folgekosten erwarten ließen.

2.1.1.2 *Effiziente Erzeugung*

Ein weiterer Punkt war die Kombination der Raumbeheizung mit der Belüftung. In der Beschreibung des GU wurde die Beheizung der Klassenräume mit Flächenheizkörpern angeboten und zwar ohne Belüftung! Es war schnell klar, dass ein modernes Gebäude, welches bei guter Verarbeitung eine hohe Dichtigkeit aufwies extern belüftet bzw. entlüftet werden musste. Ein sehr günstiger Nebeneffekt dabei: der hohe Anteil an frischer, sauerstoffhaltiger Atemluft erhöht die Konzentrationsfähigkeit der Schüler und Lehrkräfte.

Durch den Einsatz der hocheffizienten Wärmetauscher (Wirkungsgrad >70 %) im zentralen Lüftungsgerät sollte die Wärmeabgabe der Schüler zu einer deutlichen Verringerung der eingesetzten Energie beitragen.

2.1.1.3 Erneuerbare Wärmeversorgung

Im ersten Schritt wird die Luft-Vorwärmung durch einen Erdwärmetauscher vorgenommen. Dieser ist in Form von 3000 m Kunststoffrohr oberhalb des Grundwasserspiegels unterhalb der Bodenplatte verlegt und erwärmt in einer ersten Phase die einströmende kalte Zuluft (z.B. von -12°C auf 2 °C). Als besonderes „Bonbon“ kann während der Sommermonate mit der vorhandenen Erdkälte auch gekühlt werden.

Im zweiten Schritt war ursprünglich angedacht, die Energie der Solarwärmanlage einzuspeisen. Die Solarwärmanlage mit ca. 10 m³ Speicher, sollte einen weiteren Teil der notwendigen Wärme liefern um das Temperaturniveau weiter anzuheben.

Es bestand die Option ein nahegelegenes Studentenheim mit Solarwärme anteilig mitversorgen zu können. Die Anlage wurde zunächst aus wirtschaftlichen Gründen, dann aufgrund geänderter Rahmenbedingungen zurückgestellt.

In der dritten Phase wirkt der oben beschriebene Wärmetauscher über die erwärmte Abluft.

Im vierten und letzten Schritt wird die fehlende Wärmeenergie über das vorhandene Fernwärmenetz (Biogas BHKW) eingespeist.

2.1.1.4 Zusätzliche Optimierungen:

Luftvolumenreduzierung durch Mehrfachnutzung: Die Zuluft wird von der Zentrale (Wärmetauscher) auf dem Dach, über Kanäle in die Nutzräume geführt, von dort durch schallgedämmte Überströmelemente (inkl. Brandschutzklappen) in die Flure geleitet und über WC's und Nebenräumen wieder abgesaugt und durch die Kanalführung wieder zum Lüftungsgerät zurückgeführt. Dadurch werden die Flure, die WC's Bereiche und andere Nebenräume mit der Luft der Nutzräume erwärmt und be- bzw. entlüftet. Somit konnte die Luftmenge um ca. 1/3 (3.000 m³/h) reduziert werden.

Durch die Anbindung der Lüftungsanlage an den KNX-Bus und den Einsatz von KNX-Präsenzmeldern konnte eine präsenzabhängige bzw. stundenplanabhängige Raumerwärmung realisiert werden.

2.1.1.5 Reduzierung des elektrischen Energiebedarfs

Durch die niederen Geschwindigkeiten in den breiten Lüftungskanälen reduzieren sich die Druckverluste und damit der elektrische Energieeinsatz.

Das Luftvolumen insgesamt wird bedarfsabhängig und stufenlos geregelt (Strömungsgeschwindigkeit max. 3 m/s). Die Luftmenge in den einzelnen Räumen, wird wie oben erwähnt mit Präsenzmelder angesteuert und über Volumenstromregler, abhängig von Raumluftqualität und -Temperatur, stufenlos geregelt. Um auf den flexiblen Wärmebedarf in den Unterrichtsräumen schnell reagieren können, bekam jeder Raum einen Nachluftheritzer, der entsprechend den Bedarf die zentral auf ca. 15-17 °C vorgewärmte Luft, nachheizt. Eine individuell programmierte und mit entsprechen Sensoren und Stellgeräten ausgestattete Gebäudeautomation, die im laufenden Betrieb angepasst werden kann, sorgt für einen optimalen und bedarfsgerechten, sowie energiesparenden und effizienten Betrieb der komplexen Anlage. Auf die Wartungsfreundlichkeit (Häufigkeit und Zugänglichkeit), die Qualität und die Nachhaltigkeit (Betrachtung vom Einbau bis zur Entsorgung) der Produkte wurde geachtet.

2.1.2 Budgetplanung und Förderung

Die geplanten Kosten für die Projektfinanzierung lagen bei ca. 400T€. Abzüglich der angedachten Förderungen des BFA (für Solarspeicher und Kollektor: -27T€) und der beantragten und genehmigten Zuwendung durch den Innovationsfonds (-37T€) waren noch 337T€ zu finanzieren. Ein beim BMWi eingereichter Förderungsantrag wurde abgelehnt.

Dem Förderantrag beim Innovationsfond der Badenova AG wurde freundlicherweise zugestimmt.

2.2 Projektplanung

2.2.1 Energiekonzept und Studien

Im Folgenden soll das Reduzierungspotenzials von klimaschädigenden Stoffen/Schadstoffen auf Grundlage eines sogenannten Referenzgebäudes (angenommenes Standardgebäude auf das sich die Angaben in der Energieeinsparverordnung bezieht) dargestellt werden.

2.2.1.1 Gesamt-Heizwärmebedarf des Referenzgebäudes

Der Gesamt-Heizwärmebedarf für die Raumheizung (Endenergie) des Schulgebäudes setzt zusammen aus dem Lüftungswärmebedarf und den Transmissionsverlusten, wobei dieser Lüftungswärmebedarf in einer Schule deutlich höher angesetzt werden muss als es im normalen Wohnungsbau der Fall ist. (Luftwechselrate wird mit dem Faktor 4 höher angesetzt (2,0 anstatt 0,5)).

Es berechnet sich nun der Gesamt-Heizwärmebedarf wie folgt:

Heizwärmebedarf (Wohngebäude): $60 \text{ kWh/a m}^2 \times 1500 \text{ m}^2 = 90.000 \text{ kWh/a}$

Erhöhter Bedarf durch den Lüftungs-Wärmebedarf ca. 40.000 kWh/a

Gesamtwärmebedarf = **130.000 kWh/a**.

Daraus ergibt sich eine CO₂ Emission von ca. $0,180 \text{ kg/kWh} \times 130.000 \text{ kWh/a} = \mathbf{23.000 \text{ kg/a}}$

2.2.1.2 geplante CO₂-Reduzierung

- 50%ige Energieeinsparung durch den Wärmeschutz der Gebäudehülle
 $90.000 \text{ kWh/a} \times -0,5 \times 0,18 \text{ kg/kWh} = \mathbf{-8.100 \text{ kg/a}}$
- 70%ige Wärmerückgewinnung des Lüftungswärmebedarf
 $40.000 \text{ kWh/a} \times -0,7 \times 0,18 \text{ kg/kWh} = \mathbf{-5.040 \text{ kg/a}}$
- 10% durch den Erdkollektor
 $40.000 \text{ kWh/a} \times 10\% \times 0,18 \text{ kg/kWh} = \mathbf{-720 \text{ kg/a}}$
- Solarwärmeanlage ca. $90 \text{ m}^2 \times 450 \text{ kWh/m}^2 = 40.000 \text{ kWh/a}$
 $40.500 \text{ kWh/a} \times 0,18 \text{ kg/kWh} = \mathbf{-7.290 \text{ kg/a}}$
Bein einem Nutzungsgrad von 90% wären das ca. **-6.000 kg/a**
(Ausgehend von einer hohen Nutzung und die Möglichkeit das Nachbarhaus mit Warmwasser zu versorgen. Ebenso ist festzustellen, dass das massive träge Bestandsgebäude bis spät in den Frühsommer einen rel. hohen Wärmeenergiebedarf hat)

- Einsparung durch ein Gebäudeautomationssystem, welche flexibel und schnell auf den Bedarf reagieren kann. Geschätzte CO₂-Reduzierung 20 %: **-4.600 kg/a**
- Mehrfachnutzung der Luftmenge (3.8.) ca. 30% von 40.000 (kWh) = 13.000 kWh/a x 0,18 (kg/kWh) = **-2.400 kg/a**
 - **Summe der Einsparungen mit Solarwärmanlage: -26.860 kg/a**
 - **Summe der Einsparungen ohne Solarwärmanlage: -20.860 kg/a**
(entspricht ca. 115T KWh)

2.2.2 Ausführungsplanung

Nach der gemeinsamen Planung des Gesamt-Konzepts wurde die detaillierte Ausführungsplanung von der Firma Cofely (jetzt Engie) umgesetzt.

2.3 Technische Umsetzung

Im Folgenden soll die technische Umsetzung der einzelnen Anlagenteile skizziert und beschrieben werden.

2.3.1 Technische Daten und Anlagenbau

2.3.1.1 Darstellung der Luftmengen

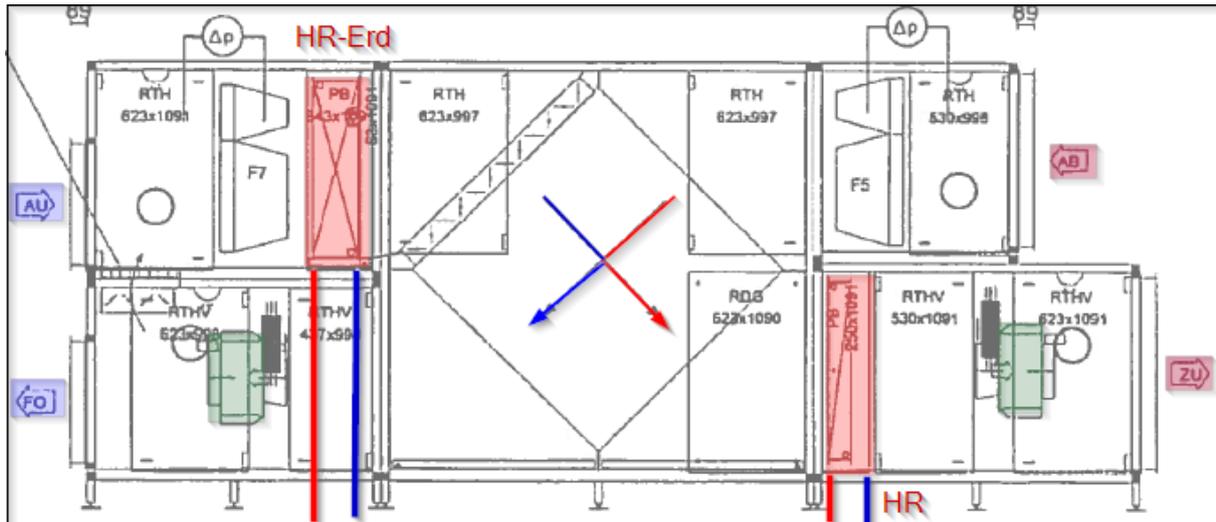
Ausgehend von der Berechnung der einzelnen Luftmengen der verschiedenen Räumlichkeiten wurde dann die Größe der Anlage gewählt. Es sollte dabei eine gewisse Reserve in Höhe von 25- 30% eingeplant werden.

Raumbezeichnung	Lüftungsvolumen
Multifunktionsraum	3600m ³ /h
Mensa	1750m ³ /h
Klassenzimmer (80m ²)	jeweils 525m ³ /h
Seminarraum (40m ²)	jeweils 325m ³ /h

In Summe liegt das Nenn-Lüftungsvolumen der Anlage bei 7.000m³/h, es könnte aber bei Bedarf auf bis zu 10.000m³/h erhöht werden. Nebstehende Tabelle skizziert die wichtigsten Räume mit den entsprechenden Volumina. Zu beachten ist, dass die elektrischen Verluste nicht linear, sondern exponentiell ansteigen.

2.3.1.2 Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Das „Herz“ der Lüftungsanlage bildet die etwa 2,4m Hohe und 6m Breite Einheit mit dem zentralen Kreuzstromwärmetauscher, den Lüftungsmotoren und den beiden Heizregister (Erdkollektor und Nachheizregister)



Im Nennbetrieb bei 7000m³/h wurden folgende Werte gemessen:

Der Plattentauscher hat eine Heizleistung von ca. 50kW. Die Zuluft wird dabei von -12°C auf +10,6°C erwärmt wohingegen der Abluftstrom von 20°C auf -1°C Austrittstemperatur gekühlt wird. Die Leistungsaufnahme der beiden Ventilatoren beträgt dabei 3,36kW (1,83kW+1,53kW). Der



Wirkungsgrad lag zwischen 67% (trocken) und 71% (feucht).

Die Leistung des Erdkollector-Registers beträgt ca. 18,7kW Heizleistung und 16,7kW Kühlleistung.

Die Leistung es Nachheizregisters liegt bei 37,5kW

2.3.1.3 Erdwärmetauscher

Wie bereits oben erwähnt, wurden ca. 3000m Kunststoffrohr unter dem Fundament eingelegt um im Winter die relative Erdwärme und im Sommer die Erdkühle zu entnehmen. Um eine Trennung des Heizwassers vom Erdkollektorwasser zu erreichen, wurde ein weiterer Wärmetauscher eingefügt. Im Erdkollektorkreis befindet sich reines Wasser ohne Frostschutzzusätze, was dazu führt, dass die der Erdwärmetauscher bei Temperaturen unter 0°C abgeschaltet werden muss.

Die Leistungsaufnahme der Erdkreis-Pumpe beträgt im Betrieb ca. 230W, die des zweiten Kreises, hin zum Wärmetauscher im Lüftungsgerät, nimmt eine Leistung von 100W auf.

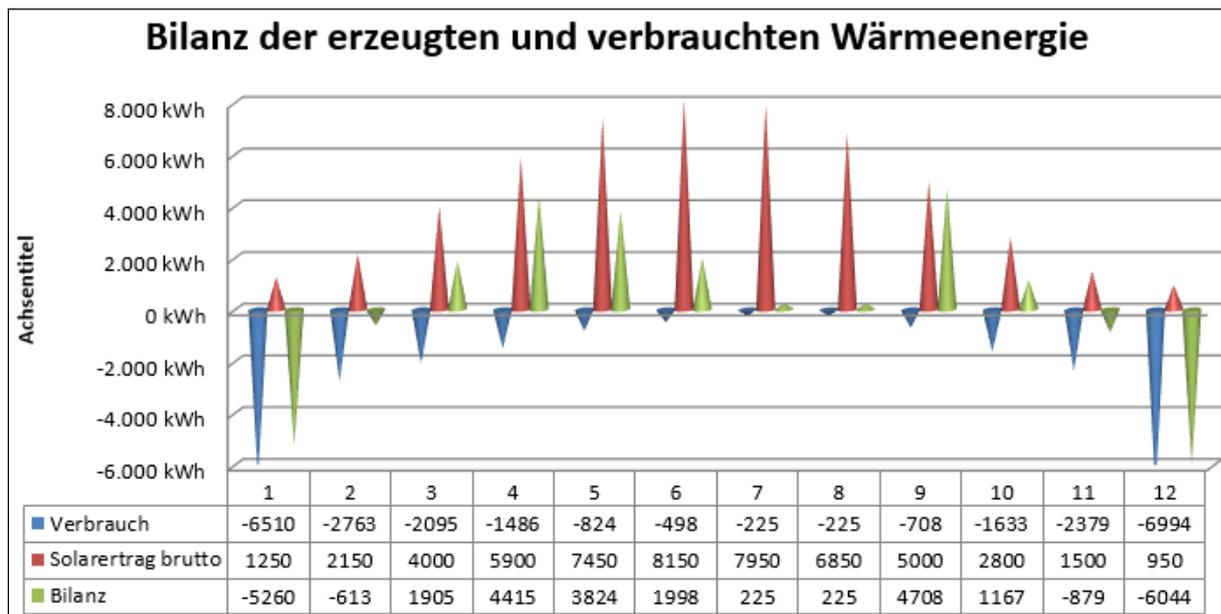


2.3.1.4 Solarkollektor

Als Option wurde die oben erwähnte aber nicht umgesetzte Solarkollektoranlage vorbereitet (Wasserführende Installation und Regelungstechnik). Zunächst wurde die Umsetzung des Kollektors aufgrund der wirtschaftlichen Situation zurückgestellt. In den vergangenen beiden Jahren aber sanken nun die Erstellungskosten für Photovoltaikanlagen stark, sodass die überlegt wurde, ob die Realisierung einer PV-Anlage der kostenintensiven Erstellung der Solarkollektoranlage vorzuziehen sei. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde noch keine Entscheidung getroffen.

Nachstehend die Planungsdaten für die Energiebilanz mit Darstellung der monatlichen Daten zum Wärmeenergieverbrauch, der voraussichtlich erzeugte Solarwärmemenge und in GRÜNEN Kegeln dargestellt, die Bilanz der tatsächlich nutzbaren Wärmeenergie (in den Monaten Juli und August wären z.B. von den fast 8000kWh Solarertrag gerade einmal 225kWh Wärmeenergie für die Brauchwassererwärmung nutzbar). Auf Basis dieser Berechnungen wäre das Projekt ein CO₂-freier Schulbau.

Darüber hinaus hatten wir gehofft, gerade den hohen Solarertrag in den Sommermonaten für die Brauchwasserversorgung des nebenstehenden Studentenwohnheims nutzen zu können. Allerdings ist der Besitzer von seiner anfangs gegebenen Zusage zurückgewichen.



2.3.1.4.1.1 *Gekürzte Darstellung der Kostenentwicklung seit Nov. 2011*

Zum Ende des Jahres 2011 kalkulierten wir die Kosten für die Kollektoranlage mit 40 Kollektoren à 2,2m² und 8000L Speicherkapazität ohne Planungskosten auf ca. 140T€. Gegen Ende 2014 erhöhte sich die voraussichtlichen Kosten auf 185T€. Unter der Annahme mit größeren Speichern die Effizienz weiter zu erhöhen (Spitzenlastkappung des Heizanschlusswertes mit weiteren 80.000 Liter) wären weitere 100T€ nötig.

Nachfolgend die gekürzte Zusammenstellung des Vergleichs der Hauptpositionen zu den Netto-Erstellungskosten der Solarkollektoranlage (2011/2014). Weitere anfallende Kosten für Preissteigerung, Planung und Baubegleitung sind weggelassen. Ebenso sind die Fördergelder (z.B KFW-Förderung für Solarspeicher) ebenfalls außen vorgelassen.

Kostenzusammenstellung					
Pos.	Produkt	Angebot vom 14.11.2011			GK (H+I) Angebot vom 28.10.2014
		Men.	EP.	GP	
	+				
	01.01. Wärmequellen			30.201,36 €	31.889,69 €
	01.02. Ausdehnungsgefäße			5.774,82 €	5.553,30 €
	01.03. Pumpen			4.683,50 €	2.831,80 €
	01.04. Wärmeträger			11.924,48 €	12.455,18 €
	01.05. Rohre			8.792,46 €	12.491,98 €
	01.06 Formstücke			10.011,56 €	15.575,79 €
	01.07. Armaturen			6.921,16 €	8.477,19 €
	01.08 Zähler			1.491,32 €	2.105,36 €
	01.09. Dämmarbeiten			13.217,10 €	26.645,24 €
	01.10. Besondere leistungen			6.381,90 €	7.949,95 €
	01.11 MRS - Technik			20.212,02 €	30.143,05 €
	Gesamtsummen (netto)			119.611,68 €	156.118,53 €

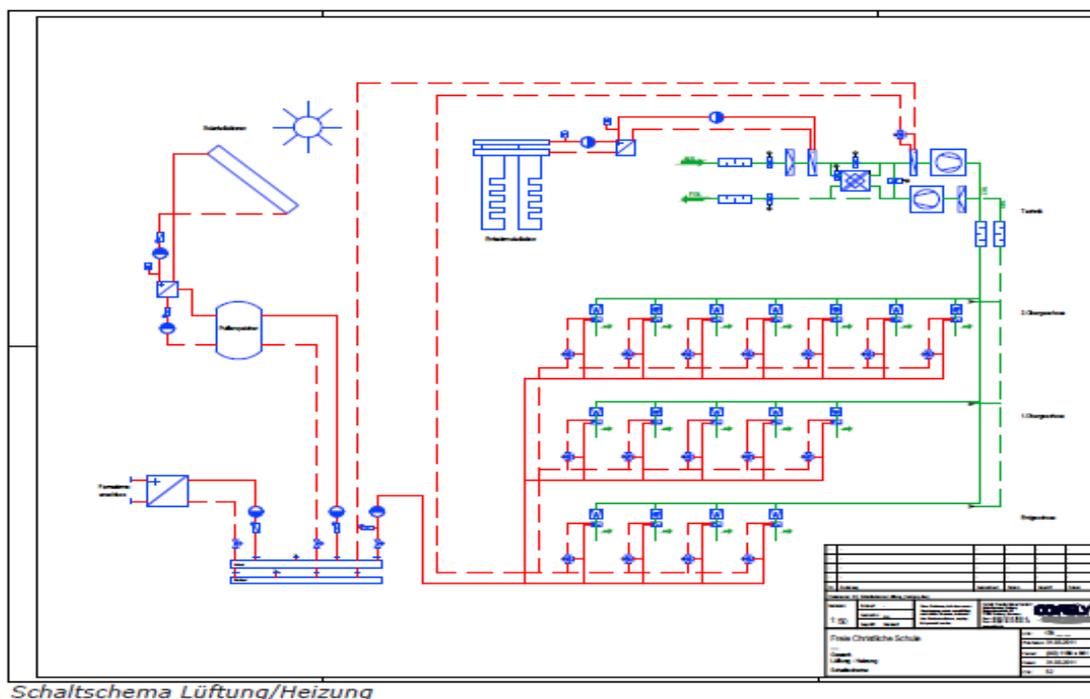
2.3.1.4.1.2 Einsparung durch den Kollektor (Überschlagsrechnung)

Unter der Annahme, dass auf diese Art und Weise jährlich etwa 30MWh mit ca. 4 Cent Wärmeenergie eingespart würden, wäre das eine Jahreskosteneinsparung von etwa 1200€. Auf eine angenommene Finanzierungszeit von 20 Jahren wären das ca. 72T€.

2.3.2 Schemata und Pläne

2.3.2.1 Gesamtübersicht der Anlage

Das folgende Schema zeigt die Funktion und das Zusammenwirken der verschiedenen Anlagenteile.



2.3.2.2 Einzelne Schemata

2.4 Anlagenbetrieb

Die Anlage ging im Juli 2013 in Betrieb. In den vergangenen Jahren wurde der Betrieb getestet und im Wesentlichen an deren Optimierung gearbeitet. Grundsätzlich funktionieren alle Anlagenteile sowie das Zusammenwirken als ganze Einheit. Besondere Vorteile ergab die Anbindung an die bestehende Gebäudeleittechnik, die über den KNX-Bus realisiert wurde.

Über eine Technikerarbeit "Anbindung einer Lüftungsanlage über OPC-Unified Architektur" an den KNX-BUS" im Schuljahr 14/15 in Zusammenarbeit mit der Walther-Rathenau-Gewerbeschule sollte die Anbindung erweitert werden, was aber leider nicht soweit vollendet wurde, dass es uns in unserer täglichen Nutzung dienen könnte. Ein besonderer Dank gilt hier Herrn Karrer von der Fa. Engie, der das Projekt ehrenamtlich unterstützt hatte.

2.4.1 Auswertung der Betriebsergebnisse

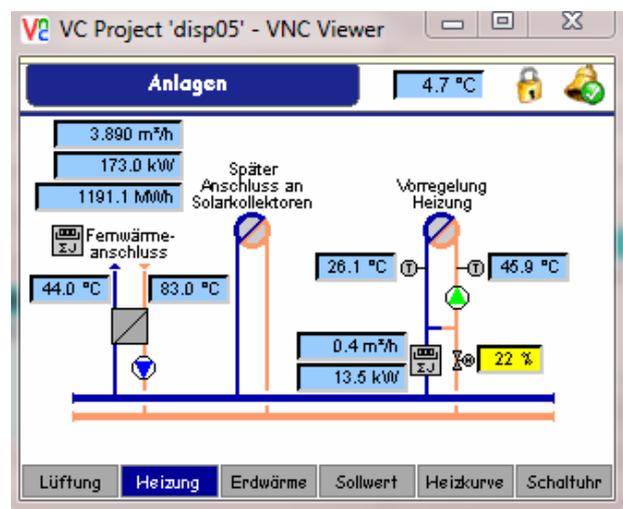
Im Folgenden sollen die verschiedenen Betriebsarten dargestellt und ausgewertet werden. Eine Betrachtung der in der bisherigen Betriebszeit aufgetretenen Störungen und der entsprechenden Lösungsansätze schließen das Kapitel ab.

2.4.1.1 „Normalbetrieb“ Heizen im Winter

Anhand der schematischen Darstellung auf dem Display der Lüftungsregelung lassen sich die unterschiedlichen Betriebsweisen gut darstellen. Zunächst soll der Betrieb eines durchschnittlichen Wintertages dargestellt und erklärt werden:

2.4.1.1.1 Anbindung an die Fernwärme

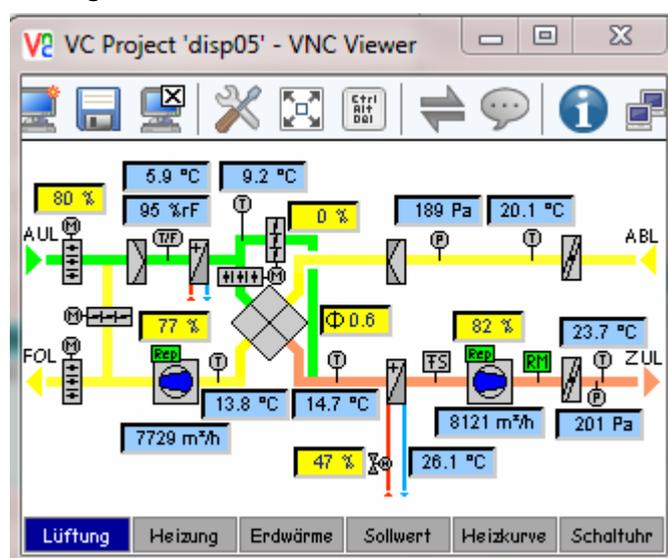
Das nebenstehende Anlagenbild zeigt den Fernwärmeanschluss (LINKS), der über einen mächtigen Wärmetauscher verbunden ist, mit den gegenwärtigen Verbrauchsdaten und die abgehenden Anschlüsse für den optionalen Solarkollektor (MITTE) und den Neubau (RECHTS). Es sind eine momentane Leistungslieferung von 173kW abzulesen. Davon werden 13,5kW für den gesamten Neubau entnommen. Die Vorlauftemperatur 45,9°C, der Rücklauf 26,1°C.



Die Außentemperatur beträgt 4,7°C.

2.4.1.1.2 Erwärmung der Zuluft

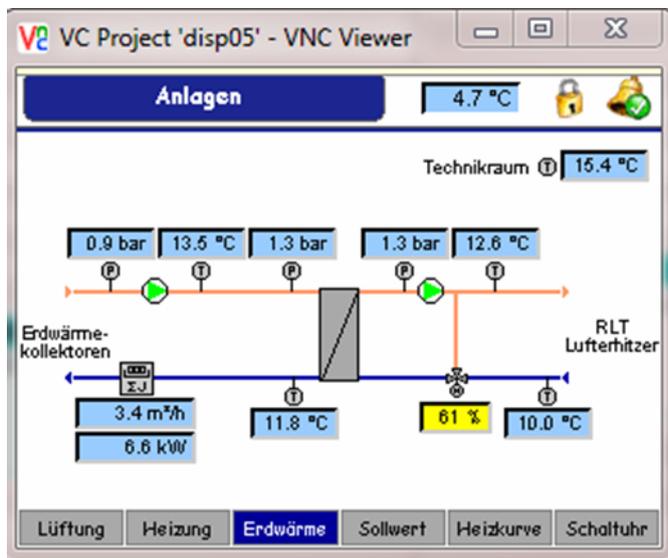
Im folgenden Analgenschema sind die Zu- und Abluftwege gut zu erkennen. Der Zustrom (GRÜN) der kalten frischen Luft wird über den ersten Wärmetauscher (Erdkollektor) bereits auf 9,2°C vorerwärmt um im nächsten Schritt den Kreuzwärmetauscher zu passieren. Mit der gegenfließenden 20,1°C warmen Abluft wird die Zuluft nun auf ein Temperaturniveau von 14,7°C erhöht bevor es durch das Fernwärmeheizregister auf 23,7°C in den Zuluft Kanal geleitet wird.



Der Wirkungsgrad des Kreuzwärmetauschers ist mit 0,6 angezeigt und die Fortluft wird mit 13,8°C wieder an die Umgebung abgegeben. Die Anlage läuft hier mit ca. 15% über der Nennleistung von 7000qm³/h. Dieser Betriebsmodus ergibt sich ausnahmsweise, wenn alle Räume gleichzeitig benutzt werden, was nicht die Regel darstellt.

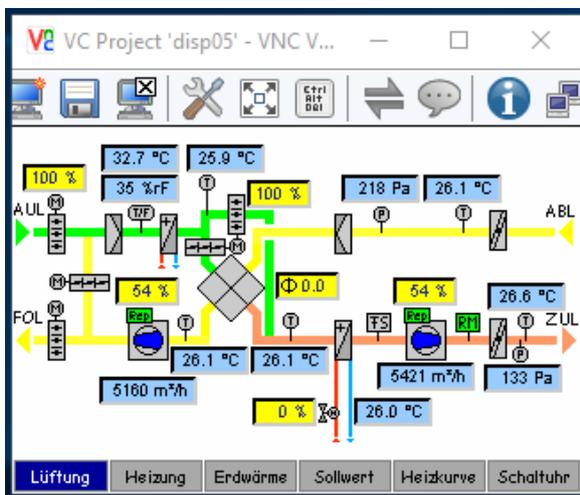
2.4.1.1.3 Der Erdkollektor wärmt vor

Im folgenden Anlagenbild ist die Vorerwärmung der Frischluft durch den Erdkollektor schematisch



dargestellt. Mit einer Wärmeleistung von 6,6kW wird die Frischluft bei Volllast der Anlage um 4,5°C angehoben. Die Leistung des Primärkreislaufs wird über ein Temperaturgefälle in Höhe von 1,7°C in den Sekundarkreis eingespeist. Dieser erhöht die RLT-Kreis-Temperatur um 2,6°C.

2.4.1.2 Sommerkühlung (20. Juli 2016)

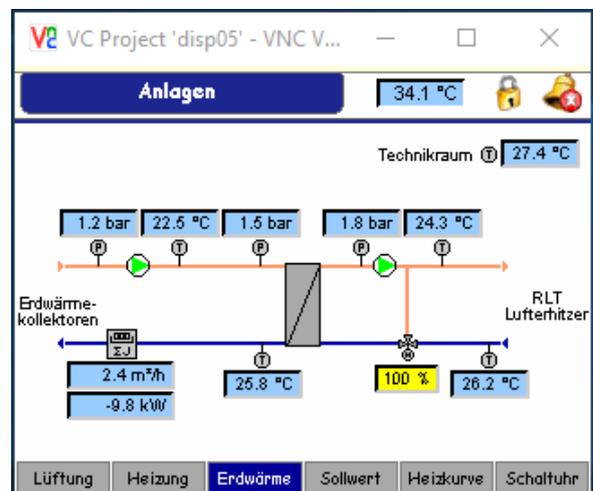


Luft wird vorgekühlt und wird über den Bypass am Wärmetauscher vorbei geleitet. Sie wird letztendlich mit 26,6°C in die Räume eingeführt.

Im folgenden Bild erkennt man gut das Schema es Erdkollektors mit den entsprechenden Betriebswerten. Die Außentemperatur beträgt 34,1°C, der Erdkollektor kühlt die einströmende Frischluft mit einer Leistung von -9,8kW um mehr als -8°C auf 25,9°C herunter. Der Vorlauf des Erdkollektors

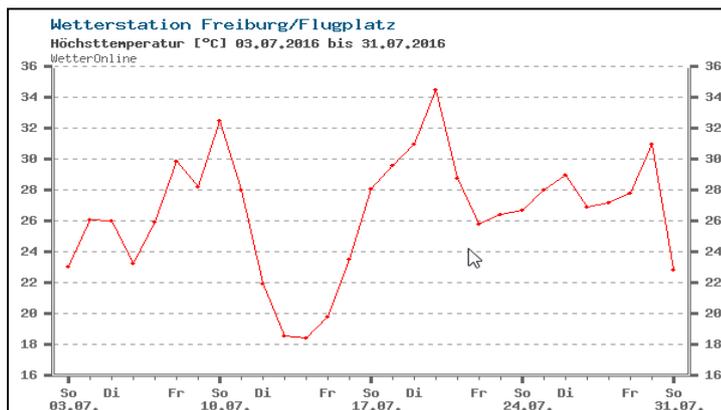
In der vorletzten Schulwoche des vergangenen Schuljahres war es für Schüler und Lehrkräfte sehr anstrengend, da es über mehrere Tage Temperaturen um 30°C hatte. Es wurden die Anlagendaten zum Höchstwert der Hitzeperiode, am 20. Juli dokumentiert.

Im linken Bild ist wieder das Anlagenschema der Lüftung auf dem Display zu sehen. Die Bypass-Klappe ist zu 100% geöffnet, die einströmende



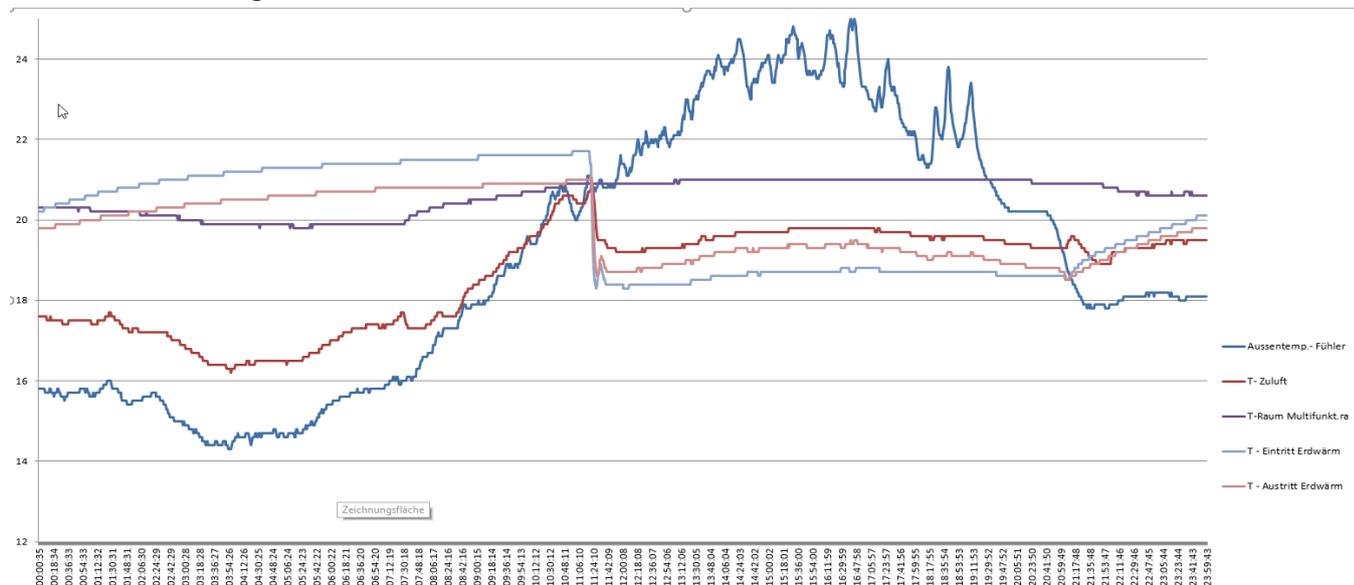
beträgt dabei bereits 22,5°C. Der Sekundärkreis des Erdkollektors hat immerhin noch eine Kühltemperatur von 24,3°C mit dem er den Zuluftstrom von 34,1°C auf 25,9°C herunterkühlt.

Die nebenstehende Grafik ist dem Wetterdienst (Wetteronline.de) entnommen und zeigt den Temperaturverlauf im Juli 2016. Für die vorgehende Wärmeperiode ist das eine beachtliche Kühlleistung.



2.4.1.3 Darstellung der Logdaten zur Sommerkühlung

In der folgenden Grafik sind die geloggteten Daten der Lüftungsanlage visualisiert. Die Außentemperatur (BLAU) erreicht mittags Werte über 25°C. Die Temperaturkurve für den Mehrzweckraum (LILA) bleibt über den Nachmittag auf konstanten 21°C. Die hellbraune bzw. hellblaue Kurve sind die Vor- bzw.



Rücklauftemperaturen des Erdkollektors. An der steil abfallenden Flanke um die Mittagszeit ist erkennbar, dass die Pumpe zum Kollektor einschaltet und gegen 20Uhr wieder ausschaltet.

In ROT ist die Zulufttemperatur dargestellt.

2.4.2 Bilanz nach 4 Jahren Betrieb

Sämtliche Verbrauchsdaten wurden zweimal monatlich abgelesen und aufgezeichnet. Die Daten der Lüftungsanlage wurden vom Programm im Ringspeichern abgelegt und von dort zunächst auch „händisch“ kopiert. Das hatte den Nachteil, dass manche Daten überschrieben wurden und somit verloren gingen. Seit August 2016 werden die Daten automatisch verschoben und sind komplett vorhanden. Um die Verbrauchsdaten der Fernwärme auch kontinuierlich loggen zu können wurde seit Januar 2015 der Fernwärmehzähler über den M-Bus angekoppelt.

2.4.2.1.1 Daten die von der Lüftungsanlage geloggt werden

Der Ringspeicher ist begrenzt, was dazu führt, dass die geloggt Daten immer nur eine Auswahl der möglichen Daten sind. Folgende Daten wurden von uns gewählt um Analysen durchführen zu können.

"Uhrzeit";"Aussentemp.- Fühler";"T- Zuluft";"T- Abluft";"T-Raum Multifunkt.ra";"T- Raum Umkleide";"T - Raum Mensa";"Feuchte - Zuluft";"Mischgas Multif.Raum";"Mischgas Mensa";"Druck Zuluftventilat";"Druck - Abluftventil";"Druck Zuluftkanal";"Druck Abluftkanal";"T - Vorlauf Heizung";"T - Rücklauf Heizung";"T - Eintritt Erdwärm";"T - Austritt Erdwärm";"T - Vorlauf Vorerhit";"T - Rücklauf Vorerhi";"Erdwärme m³/h";"Erdwärme KW";"Heizung m³/h";"Heizung KW";"T - Zuluft nach Erdw";"T - Zuluft nach WRG";"T - Abluft nach WRG";"T - Vorl. Fernwärme";"T - Rückl. Fernwärme";"Fernwärme m³/h";"Fernwärme KW";"Fernwärme MWh"

Die Menge der Daten ist beachtlich und riesig groß. Letztendlich stellte dies uns auch eine große Herausforderung dar. So kommen an einem Tag rund 50.000 Datenpunkte in einer csv-Dateien zusammen. Zur Darstellung in einer üblichen Tabellenkalkulation ist auch das nicht ganz einfach, so dass i.d.R. nur qualitativ damit gearbeitet werden konnte.

2.4.2.1.2 Verbrauchsdaten von 2013 bis 2016

Zeitraum	2013	2014	2015	2016
Heizung Neubau	4,80 MWh	13,61 MWh	38,71 MWh	49,00 MWh
Heizenergie Erdkoll.	5.100 kWh	2.554 kWh	3.169 kWh	2.050 kWh
Heizenergie /Jahr*m ²	3,2 kWh	9,1 kWh	25,8 kWh	32,7 kWh
Kühlenergie	3.200 kWh	3.877 kWh	4.676 kWh	3.502 kWh

Obige Tabelle stellt die Daten der letzten 4 Jahre dar. Was sofort auffällt, ist der stark steigende Verbrauch von Jahr zu Jahr. Da der Betrieb im Sommer 2013 aufgenommen wurde fehlt dort eine Jahreshälfte an Wärmeverbrauch. Zudem war das Gebäude im ersten Schuljahr 13/14 nicht voll besetzt. Ein weiterer Punkt war, dass das ganze Gebäude subjektiv (so die Rückmeldung der Lehrkräfte und Schüler) zu kalt war. Definitiv musste an der Sparschraube etwas geändert werden. Da die Klassenzimmer morgens zum Schulbeginn mit 17°C zu kalt waren, wurde im Winter 2014 beschlossen die Räume vorzuheizen (näheres dazu im nächsten Abschnitt). Es wurde jeweils der Raum-Stundenplan in der GLT hinterlegt damit zu Beginn des Unterrichts die Räume auf mind. 19°C vorgeheizt waren. Das führte ab November 2014 einerseits zur Freude der Schüler und Lehrkräfte und auf der anderen Seite natürlich zu einem deutlichen Anstieg der eingeführten Wärmeenergie.

Wir gehen davon aus, dass sich im Durchschnitt ein jährlicher Energieeintrag von 35MWh einpendeln wird. Das würde auf die Nettogebäudefläche von 1500qm einen Energieverbrauch von 23kWh/Jahr*m² bedeuten. Die CO₂ Emission liegt hierbei bei:

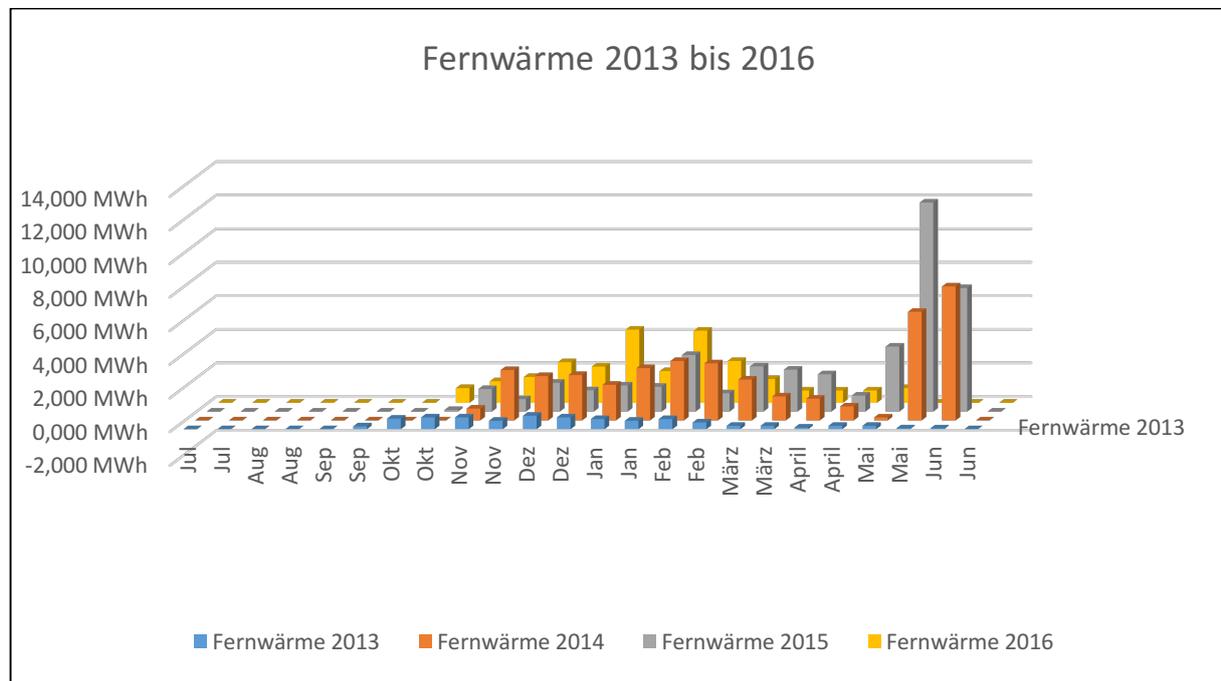
$$35.000\text{kWh/a} \times 0,18 \text{ kg/kWh} = \mathbf{6.300 \text{ kg/a}}$$

Bezogen auf den Verbrauch auf das eingangs genannte Referenzgebäude mit 23.000 kg/a ist das eine Einsparung von 73%.

2.4.2.1.3 Zugeführte Fernwärme

Um eine bessere Vergleichbarkeit für den Betrachtungszeitraum zu erhalten wurden für die Auswertungen der folgenden drei Unterkapitel der Zeitbereich Juni bis Juli des Folgejahres

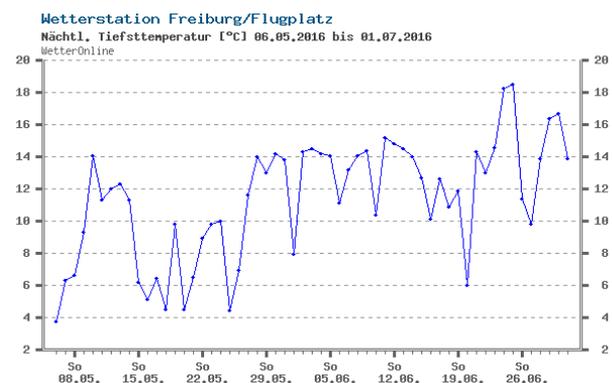
betrachtet. So sind die im Kapitel 2.4.2.1.2 genannten Jahressummen mit den hier genannten nicht direkt zu vergleichen! Die Benennung „Fernwärme 2013“ stellt z.B. den Zeitbereich Juni 2013 bis Juni 2014 und meint den Winter 13/14.



Die Datenreihen der obigen Grafik „Fernwärme 2013-2016“ veranschaulicht die Verteilung der zugeführten Fernwärmemenge seit Erstellung. Es fällt auf, dass eben im Vergleich zu den folgenden Jahren im Jahr 2013 extrem wenig Energie zugeführt wurde. Im ersten Jahr war es definitiv zu kalt im Neubau. Auch die Vorlauftemperaturen der Flächenheizkörper waren viel zu niedrig. Dies wurde im Folgejahr behoben.

Alle Wintermonate von November bis in den April zeigen eine gut nachvollziehbare Verteilung der Wärmelieferung. Die „Ausreißer“ im Mai/Juni der Jahre 2015 und 2016 konnten allerdings bis jetzt noch nicht erklärt werden.

Die Tiefsttemperaturen lagen in der Mai-Juni-Periode zwischen 8°C und 12°C.

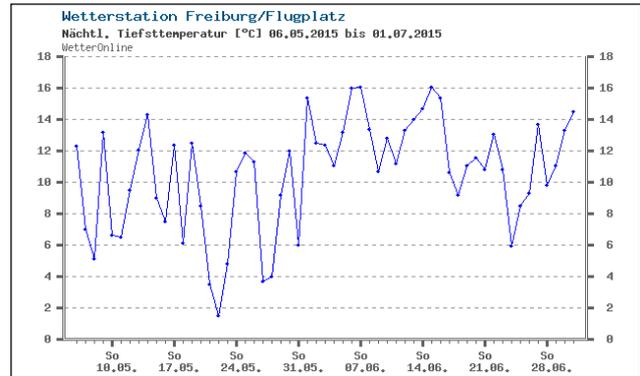


Die Tiefsttemperaturen in 2015 lagen in der Mai-

Periode ebenfalls bei ca. 8°C und im Juni gar bei 12°C. In diesen 4 Wochen wurden ca. 15 MWh „verbraten“. Der Gesamtenergiebedarf inkl. Altbau lag in diesen 8 Wochen bei 25MWh. D.h. es wurden hier 60% der gesamten Wärmeenergie in den Neubau geführt. Das Verhältnis liegt hier in der Regel bei 3-10%. Es spricht einiges dafür, dass die Werte nicht realistisch sind.

Zieht man die 15MWh ab, liegt der Gesamtverbrauch in 2015 unter 25MWh.

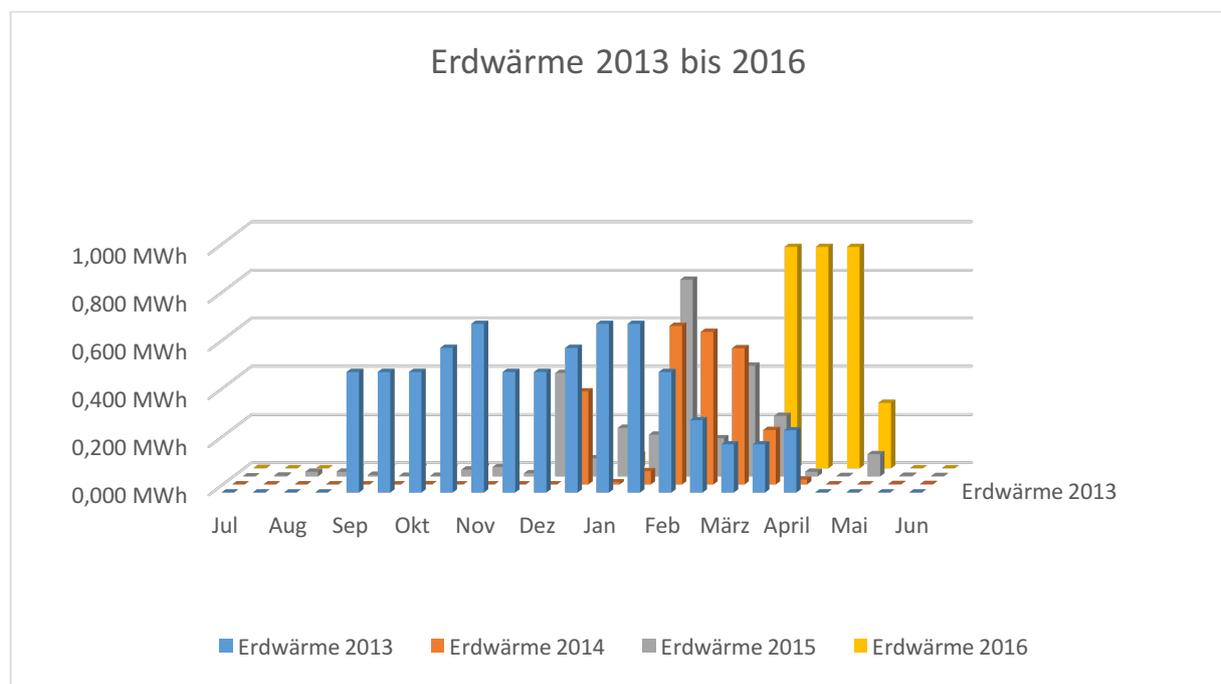
Im Mai 2016 sind zwar rel. Niedrige Tiefsttemperaturen zu verzeichnen aber im Juni haben wir auch wieder durchschnittlich 12 °C. Der extrem hohe Energieverbrauch in Höhe von 20MWh ist dadurch aber nicht zu erklären. Auch hier wurden wieder 60% der gesamt gelieferten Fernwärme in den Neubau gespeist. (Gesamtlieferung für die beiden Monate war 33,6MWh). Auch hier würde man auf einen Verbrauch unter 30MWh kommen.



Abschließend ist es eben noch nicht erklärbar.

2.4.2.1.4 Zugeführte Erdwärme vom Erdkollektor

In der folgenden Grafik ist die erbrachte Leistung vom Erdkollektor dargestellt. Auch ergeben sich Fragen die nicht schlüssig zu beantworten waren. Gerade das erste Jahr war durchweg von September bis in den April ergiebig. Die Monate Sep/Okt/Nov der Folgejahre brachten kaum Ertrag. Die vielen Ausfälle aufgrund des Druckabfalls und der Undichtigkeit sind hier nur begrenzt eine Erklärung dafür. Überraschen sind die Erträge des aktuellen Jahres 2017, die den gesamten Jahresertrag in nur 2 Monaten erbracht haben.

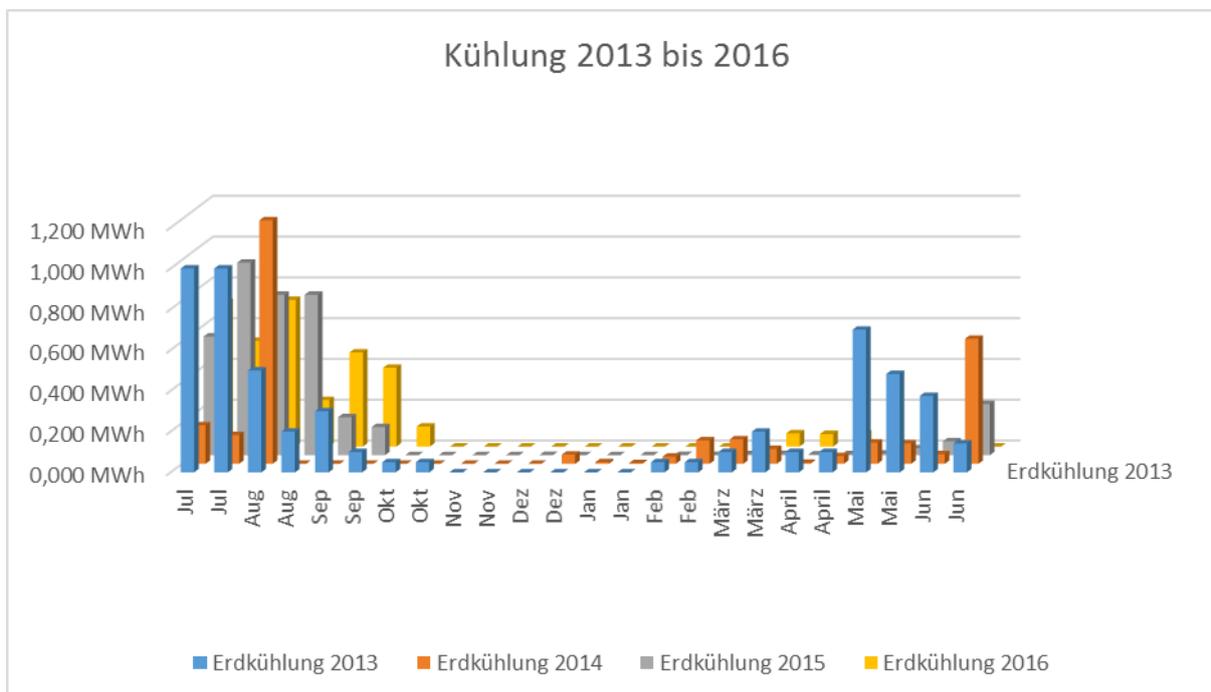


2.4.2.1.5 Zugeführte Kühlenergie vom Erdkollektor

Die durchschnittlich ca. 3,8MWh eingebrachte Kühlleistung verteilt sich im Wesentlichen auf die Monate März bis September. Im Dezember 2014 stellten wir fest, dass die Anlage im „tiefsten“ Winter kühlt. Nachdem der Erdkollektor im Umluftbetrieb (keine Präsenz, z.B. Wochenende) gesperrt wurde, konnte das Phänomen behoben werden).

Warum in den Übergangsmoaten (Okt/Jan/Feb/März) Kühlleistung erbracht wird, ist noch nicht klar. Da die Anlage bei Temperaturen zwischen 0°C und 5°C stündlich prüft, ob sie Wärmeenergie liefern kann, liefert sich in diesen Fällen auch Kühlenergie, wenn die Temperaturen im

Lufterhitzerkreis höher sind als im Erdkollektor. Allerdings sollte sich dieser Effekt auch in den anderen Wintermonaten bemerkbar machen.



2.4.3 Aufgetretene Störungen

Im Laufe der letzten dreieinhalb Jahre traten einige „normale“ Betriebsstörungen auf und einige Störungen in dem Sinne, dass sich die Anlage anders verhielt, als erwünscht. Anhand dieser Störungen allerdings konnte die Anlage weiterentwickelt und optimiert werden. Es sollen im Folgenden die Störungen und z.T. deren Lösungen im Einzelnen dargestellt werden.

2.4.3.1 Ausfall des Erdkollektorkreises

Nachdem der Erdkollektor mehrmals mit der Meldung „Druckabfalle“ ausfiel, war die schlimmste Befürchtung, dass eine undicht gewordene Erdschlaufen zum Stillstand geführt hätte. Letztendlich wurde die Leckage direkt am Sammel-Anschlussbalken des Kollektors gefunden und behoben.

2.4.3.2 Zu viele Fluchttüren in der Mensa

Die vielen Türen, die in der Mensa als Fluchttüren eingebaut wurden, ermuntern dazu, an Frühlings und Sommertagen die Türen offen stehen zu lassen. Das führt dazu, dass die Anlage kräftig frische Luft einführen und Verbrauchte abführen will und auch tut. Im Grunde ist in diesem Falle die Lüftung völlig überflüssig, da das Frischluftvolumen durch die offenen Türen und den vorhandenen Durchzug viel höher ist als das, was die Lüftung leisten kann.

Lösung: Eine Lösung wären Türkontakte, die die Anlage dann abschalten oder zumindest die Luftmengen deutlich verringern. Das wurde zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht umgesetzt.

2.4.3.3 Abfall des Wirkungsgrades des Wärmetauschers

Im Laufe des Jahres 2015 stellten wir fest, dass der Wirkungsgrad des Kreuzstromwärmetauschers mehr und mehr abgenommen hatte. Es wurden festgestellt, dass die Bypass-Klappe nicht mehr

richtig schloss und die kalte Zuluft teilweise über den Bypass geführt wurde. Dies senkte den Wirkungsgrad des Tauschers.

Lösung: Zunächst wurde der Antrieb der Klappe mit einem stärkerem Stellventil versehen, was aber nicht den gewünschten Erfolg brachte.

Bypass-Klappe schließt nicht-> Austausch im Januar 2016

2.4.3.4 Zu geringe Temperatur in den Fluren

Nachdem immer mehr dazu übergegangen wurde, die Flure auch für den Unterricht zu nutzen, fällt auf, dass die Temperaturen in den Fluren im Winter zu kühl sind um sich dort dauerhaft sitzend und schreibend (ohne körperliche Bewegung) aufzuhalten. Ursprünglich war das so nicht einkalkuliert worden.

Lösung: Um die Temperaturen auch in den Fluren zu erhöhen (besonders die Abschnitte des Verbindungsflurs zum Bestandsgebäude hin sind vom Luftaustausch völlig abgeschnitten) wird es unumgänglich sein, dort Flächenstrahler zu installieren.

2.4.3.5 Oberlichter für Kühlung

2.4.3.5.1 Klassenzimmer/Büros

Einen Punkt, den wir aus heutiger Sicht definitiv anders machen würden, ist die Thematik der elektrisch betriebenen Oberlichter.

Wir hatten auf die Oberlichter im Vorfeld bedauerlicherweise verzichtet. Manuelle Oberschließer schieden aus, weil wir vermeiden wollten, dass die Oberlichter offen sind während die Lüftungsanlage arbeitet (sowohl im Sommer, wenn die kühle Luft die eingeblasen wird gerade wieder hinausströmt und im Winter, wenn die warme Luft ebenso hinausströmt). Zum andern hatten wir die Mehrkosten für elektrisch betriebenen Oberlichter nicht investieren wollen.

Es stellte sich heraus, dass die programmierte Nachtkühlung über die Lüftungsanlage sehr uneffektiv war, da es die eingeführte Kaltluft nicht schaffte den Raum über Nacht runter zu kühlen. Es war so programmiert, dass die Kühlung einsetzte, wenn die Außentemperatur eine bestimmte Differenz zur Innenraum Temperatur erreicht hatte und gleichzeitig auch die Außenluft einen bestimmten Wert unterschritten hatte. Trotzdem die Lüfter die halbe oder sogar ganze Nacht durchliefen, wurden die Klassenzimmer kaum gekühlt.

Im Nachhinein müssen wir feststellen, dass steuerbare elektrisch betriebene Oberlichter deutlich effektiver gewesen wären.

2.4.3.5.2 Flure

Bei den Fluren ist die Situation sogar noch extremer, weil dort letztendlich überhaupt keine Kühlung umgesetzt werden kann. Hier kommt uns die „energieeffiziente Mehrfachnutzung“ der Zuluftführung (aus Kapitel 2.1.1.4) in die Quere. Die sehr warme Luft, die mittels der Überströmkanäle aus den Klassenzimmern in die Flure fließt, kann in den Fluren keine merkbare Kühlung erwirken.

Hier würden die Oberlichter absolut nützlich sein

Lösung: Leider ist die nachträgliche Installation der Oberlichter in die aufwändige Fassade mit sehr hohen Kosten verbunden. Daher ist ein nachträglicher Einbau unwahrscheinlich und unökonomisch.

2.4.3.6 Stickinge Luft in den Fluren

In den Sommermonaten fällt ein weiteres Problem auf, was wiederum durch die „Mehrfachnutzung“ der Luftführung bedingt wird. Die Abluft der Klassenzimmer sind nicht nur warm, sondern auch verbraucht. Sportlehrer pubertierender 8ten Klassen können da ein Lied davon singen ☺.

Lösung: Die Zu- und Abluftführung der Flure sollte noch einmal überdacht werden, wie man die Abwärme der Klassenzimmer direkt nutzen könnte und ohne „schlechte“ Luft in den Fluren zu erhalten.

2.4.3.7 Erdkollektor kühlt in den Wintermonaten

Beschreibung unter Punkt 2.4.2.1.5

2.4.3.8 Hohe Druckunterschiede von Zu- und Abluft

Um keinen Über- oder Unterdrücke in den einzelnen Bereichen zu erhalten, sind die Bereiche, die lufttechnisch eine Einheit bilden nach Zu- und Abluftvolumina exakt berechnet. Nun mussten wir im Laufe der letzten Monate den Abluftdruck (als Regelglied für die Drehzahl Lüftungsmotoren) mehr und mehr nach oben regeln um eine ausgeglichene Zu- und Abluftvolumina zu erhalten.

Lösung: Gegenwärtig konnten wir das Problem noch nicht verorten und beheben. Wahrscheinlich öffnet eine der Klappen nicht vollständig.

2.4.3.9 Morgens zu kalt im Klassenzimmer

In den ersten beiden Winter war es rückwirkend betrachtet doch ziemlich kalt im Neubau. Die Absenkttemperatur lag bei 17°C. Gerade bei Wochenenden und Feiertagen wurde dann die Absenkttemperatur in den Klassenräumen erreicht und natürlich gehalten. Wenn die Schüler dann morgens kamen, dauerte es bis zur dritten Stunde, bis die Klassenzimmer dann auf annehmbare 20°C aufgeheizt waren.

Lösung: Es wurden 16 KNX-Aktorkanäle installiert und deren Ausgang in der Lüftungsanlage abgefragt. Da es in der GLT grundsätzlich möglich war Wochen- und Jahreskalender zu hinterlegen, wurde die erste Stunde eines Klassenzimmers im Wochenplan abgebildet und eine 45-minütige Vorheizphase parametrisiert. Diese war mit einem Jahreskalender verknüpft, sodass die Vorheizung nur in der notwendigen Winterzeit aktiv war.

2.4.3.10 Abgestandene Luft

Die präsenzgeregelte Lüftung führte z.B. dazu, dass sich ein über längere Zeit ungenutzter Raum sehr stickig angefühlte.

Lösung: Auch dieses Problem ließ sich durch die eingebaute Schnittstelle (KNX-Aktor) lösen. Es konnten somit „Spülzeiten“ eingerichtet werden, in denen das Klassenzimmer eine bestimmte Zeit mit Frischluft (z.B. auch ohne Heizung) durchgespült wurde.

2.4.3.10.1 Technikerprojekt mit der Walther-Rathenau-Gewerbeschule

Da wir bereits in den Vorjahren ein Techniker-Projekt für den praktischen Teil der Technikerprüfung betreut hatten und Herr Karrer von der Firma Cofely signalisiert hatte dort gerne auch behilflich zu sein, entschieden wir uns für 14/15 ein gemeinsames Projekt durchzuführen.

Ziel war es, die Lüftungsanlage mit der auf dem KNX-Bus basierten GLT über IP zu verbinden, um so lesend und schreibend auf die Lüftungsanlage über die GLT zugreifen zu können.

Leider blieb das Ergebnis der Technikerarbeit weit unter dem, was als Ziel definiert wurde. Letztendlich wurde die Abschlussprüfung vom Prüfling auch nicht bestanden. Grundsätzlich wurde aber die Möglichkeit aufgezeigt.

Einen herzlichen Dank gilt an dieser Stelle Herrn Karrer von der Firma Cofely, der die Umsetzung mit vielen Stunden ehrenamtlicher Tätigkeit unermüdlich unterstützt hatte.

Lösung: Gegebenenfalls wollen wir das Projekt erneut vergeben.

2.4.3.10.2 Anlage auf Störung –keiner merkt es-

Eine interessante Feststellung ist, dass man sich das Leben manchmal selbst schwermacht. Nur so ist es erklärbar, warum bis zum heutigen Tag keine E-Mail bei Betriebsstörung abgesetzt wird. Wir hatten es zwar schon eingangs ins Pflichtenheft gebracht und auch zwischenzeitlich erwähnt, dann fehlten die SMTP-Daten aber irgendwie ging es immer wieder unter.

Leider war es dadurch oft so, dass Störungen der Anlage verspätet, manchmal erst Wochen später erkannt und behoben wurden.

Lösung: Die Analyse und Zeiteffizienz priorisieren bzw. erhöhen. ☺

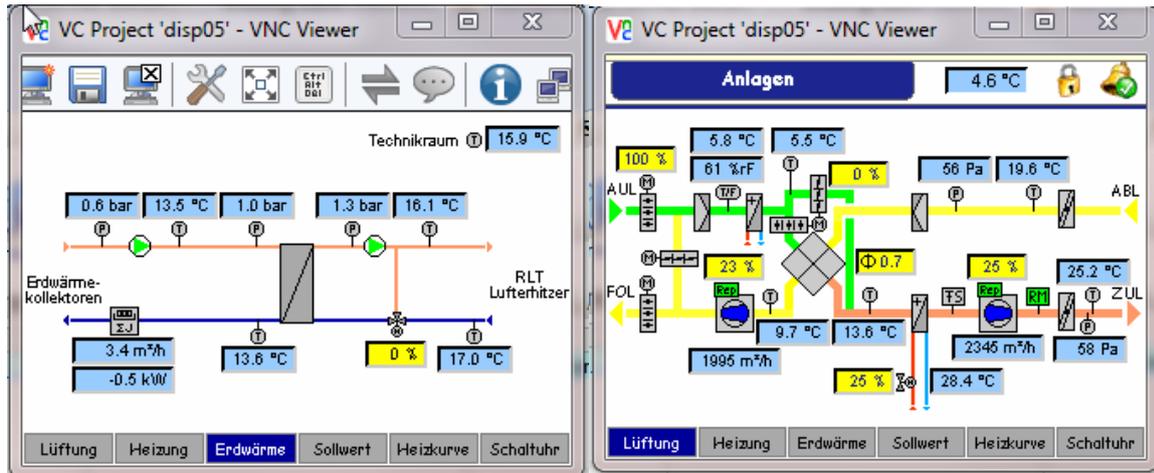
2.4.3.11 Erdkollektor „springt nicht an“ obwohl genügend dT vorhanden wäre (Progammierung wurde geändert 2.4.15)

Die folgende Darstellung stellt exemplarisch den Aufwand dar, um neue Systeme zu testen und nachhaltig zu verbessern.

Ein VNC-Viewer bringt das Display der Lüftungs-Anlage auf dem Bildschirm:

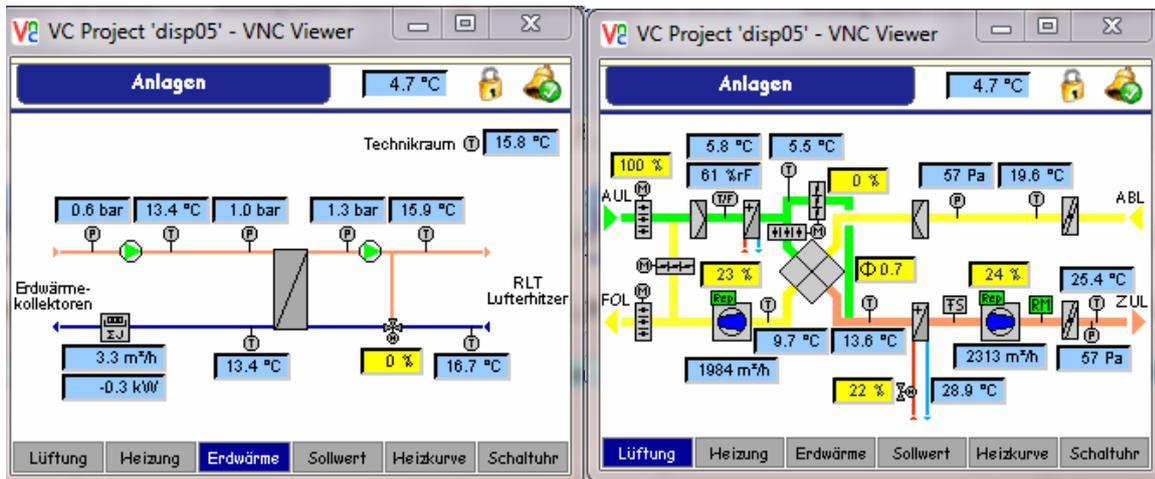
Es ist Osterdienstag, im April 2015 um 9:38Uhr; es sind Ferien, keine Belegung, 5°C Außentemperatur. Die Erdwärme sollte/könnte jetzt eigentlich gut vorwärmen, macht sie aber nicht!

Der Blick auf das Erdwärmeregister lässt erkennen, dass die Erdkollektor-Pumpe läuft und den WT bedient. Auch die Sekundarkreis-Pumpe die die kostbare Erdwärme an den ersten WT im Luftstrom bringen soll läuft, nur das entsprechenden 3-Wege-Ventil ist geschlossen (GELB: 0%). D.h. der Sekundarkreis-Pumpe pumpt das warme Wasser im kleinen Kreis herum. Die Lüftungsanlage könnte die 13°C aus dem Erdkreis gut gebrauchen um die 4,6°C kalte Luft zu erwärmen. Sie holt sich die Energie (6-10KW) aus der Fernwärme.



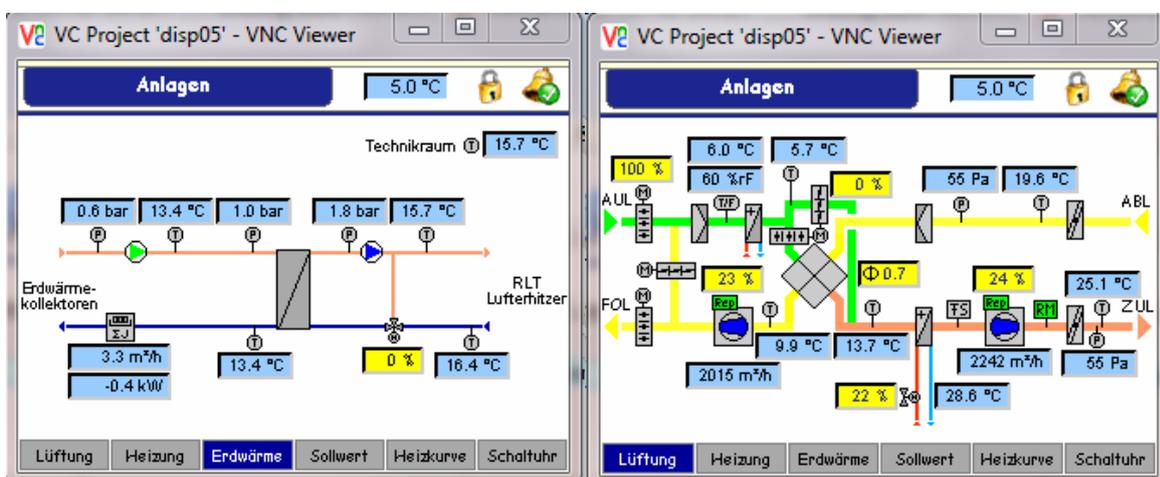
Anlage genau 6 Minuten später um 9:44Uhr:

Im Lastbereich fand keine Änderung statt, die Anlage läuft weiter mit ca. 23% der Nenn Drehzahl. Die Temperaturverhältnisse haben sich auch nicht geändert, die Pumpe läuft fröhlich im Kreis herum.



Weitere 6 Minuten später um 9:50Uhr:

Die RLT-Pumpe ist abgeschaltet, der Erdwärmekreis ist aber noch im Betrieb. Das Lastverhalten und die Temperatur sind unverändert.



Fazit: Es braucht Zeit, die Anlagendaten zu gewinnen und analysieren, sich den Arbeitsmodus der Anlage klar zu machen um einschätzen zu können an welcher Schraube denn nun gedreht werden muss um in diesem Fall den Erdkollektor in den Modus zu bringen, dass die kostbare Erdwärme genutzt werden kann.

2.5 Ökologischer Nutzen

2.6 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

2.6.1 Investitionskosten

Die Gesamtausgaben (Heizung/Lüftung) lagen bei rund 320T€, darin enthalten sind die Planungskosten, RLT-Eigenverdrahtung, Erstellungskosten und die sogenannten Innovationskosten die den Mehraufwand gegenüber dem Referenzgebäude beziffern (Erdkollektor 30T€, hoch-effiziente Wärmerückgewinnung 10T€, Präsenzmelder, Automation 20T€, verbesserte Gebäudehülle 35T€, erhöhte Planungskosten 10T€, größere Kanäle und Geräte wegen den niederen Druckverlust 15T€). Diese innovativen Mehrkosten liegen bei ca. 120T€.

2.6.2 Verbesserung der Wirtschaftlichkeit

Verglichen mit dem berechneten Energieverbrauch für das Referenzgebäude nach dem gesetzlich vorgegebenen Mindeststandard von ca. 130.000 kWh/a (Punkt 2.2.1.1.), mit den tatsächlichen Wärmeenergieverbrauch von ca. 35.000kWh/a (Durchschnittswert von 3 Jahren), ergibt dies eine Einsparung von ca. 95.000 kWh Wärmeenergie im Jahr, was wie bereits oben dargestellt eine Reduzierung um 73 % darstellt.

Bei einem angenommenen Wärmepreis von 0,10 €/kWh (mäßige Preissteigerung berücksichtigt), ergibt dies eine Kosteneinsparung von ca. 9.500 €/a. Die Amortisationszeit der Mehrkosten beträgt ca. 12,5 Jahre. Die eingesparte kWh kostet demnach ca. 0,11 €/kWh, ohne weitere Preissteigerung. (Berechnungsdaten: 120.000 € + Zinsen von ca. 40.000 €, bei einem Annuitätendarlehen mit einer Laufzeit von 20 Jahren und einer 3 % Verzinsung, geteilt durch eine durchschnittliche Abschreibungszeit von 20 Jahren, geteilt durch 95.000 kWh/a.)

Hinzu kommen noch etwas höhere Wartungs- und Reparaturkosten. Diese sind jedoch kaum ermittelbar und dürften durch die erzielten ebenfalls von uns schwer ermittelbaren Stromersparungen, mehr als ausgeglichen werden.

3 Wirkung der Umsetzung

3.1 Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb

Im Grunde sind die Auswirkungen bereits im Projektziel erfasst: dies sind verringerte laufende Kosten, deutlich geringere CO₂-Belastung der Umwelt, Verbesserung des Raumklimas bzw. des Sauerstoffgehalts der Luft und damit auf die Lernfähigkeit. Sicherlich wird auch noch die Lebenserwartung der gesamten Anlagen durch den schonenderen Betrieb (Rohrdimensionierung) verlängert.

3.2 Weiterführende, resultierende Maßnahmen

Als weiterführende Maßnahmen wären die Weiterführung des Monitorings und weitere Anpassungen der Gebäudeautomation an den laufenden Schulbetrieb zu nennen.

Zudem sollte der Markt weiter beobachtet werden, insbesondere zu den Themen der Solarenergienutzung und deren Speicherung.

3.3 Übertragbarkeit der Projektergebnisse

Durch die durchdachte Vernetzung von, marktüblichen Komponenten (Solarwärme, Erdwärme, energiesparendes Bauen und Nutzen, Wärmerückgewinnung und einer Gebäudeautomation die den Verbrauch bedarfsgerecht steuert und für eine hohe Effizienz sorgt, wird die CO₂ freie und erneuerbare Energieversorgung weitgehend erreicht. Dies ist bei jedem Schulneubau oder Schulsanierung und auch bei vielen anderen Gebäuden, in angepasster Form, gut möglich.

Durch die Tatsache, dass es sich um eine Schule handelt, die von vielen Schülern (im Alter von 6 - 19 Jahren) besucht wird und deren Eltern und Lehrkräfte ein- und ausgehen, ist die Beispiel- und Multiplikationswirkung sehr hoch. Diese wird durch interne und öffentliche Informationsveranstaltungen (z.B. die Schulhausbegehungen bei den jährlich mehrfach stattfindenden Informationstagen und "Tagen der offenen Tür") weiter erhöht und durch ein Monitoring und die laufenden Veröffentlichungen der Ergebnisse verstärkt.

4 Öffentlichkeitsarbeit

4.1 Führungen und Vorträge

Es fanden verschiedene Vorträge und Führungen statt, z.B. die Projektvorstellung von Paul Frener beim Elternabend, Führungen mit Fr. Anke Held und den Mitgliedern der Badenova- Innovationsfonds-Jury, Führungen bei der Einweihung des Gebäudes, Gebäuderundgänge bei den Infotagen und Tagen der offenen Tür. Teilnahme und Auszeichnung beim Klimaschutzpreis der Stadt Freiburg „Umweltbildung anhand energiebezogener Baumaßnahmen“.

4.1.1 Führungen durchs Schulgebäude

Bei den Führungen bei Infoveranstaltungen dienen die vier Projektplakate anschaulich den Erklärungen zur Projektdarstellung.

Schülerweiterung mit klimaneutraler Energiebilanz

01

Am Anfang war ...

... die einfache Frage: "Was können wir bei der Umsetzung des geplanten Erweiterungsbaus der Freien Christlichen Schule tun um den Bildungsauftrag der Nachhaltigkeit nicht nur theoretisch zu formulieren, sondern authentisch zu leben".



Fotos: Bestand (oben u. unten)



Ansichten: NO (oben) SW (unten)



Grundriss: Erdgeschoss (Mensa+Multiraum)

Doch, es müsste gehen!

- Man füge zusammen:
- Gebäudehülle mit erhöhter Anforderung (40% unter EnEV 2009)
 - 100qm Solarkollektorflächen und intelligentes Puffermanagement für solares Heizen
 - Luft-Vorwärmer mit ca. 2000m Erdwärmetauscher
 - Energieeffiziente Beleuchtungsmanagement mit KNX-Bussystem
 - Optimierte stundenplanabhängige Raumheizung
 - Solarstromanlage (bereits realisiert auf Bestandsgebäude)

- und falls es dann doch nicht reicht:
- Kraft-Wärmegekoppelter Fernwärmeanschluss als "Notheizung"

Sollte es nicht möglich sein ...

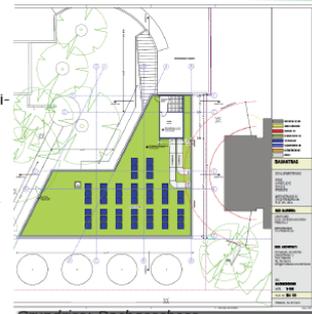
- zu verhindern, dass die Energie die 200 Kinder und Jugendliche ständig "erzeugen" einfach verpufft?
- das neue Gebäude architektonisch und funktionell an das Bestandsgebäude mit der markanter Glasrotunde (Backsteingebäude mit verglastem Rund-Foyer) zu integrieren?
- die z.T. Jahrhundert alten Baumbestände bestmöglichst zu schützen und deren natürlichen Beschattung zu nutzen?
- die Energie der Sonne zum Heizen zu verwenden?
- mit der schuleigenen PV-Anlage den nötigen Strom zu liefern
- auch noch frische "Denkerluft" in die Räume zu bringen?
- und das ganze auch noch bezahlbar??

kurz:

... innovativ & klimaneutral zu bauen?

...und darüber hinaus...

- kann die überschüssige Energie der sonnenreichen Monate 03-07 und 09-10 komplett in das Bestandsgebäude fließen
- und die überschüssige Energie der Ferienzeiten (08-09) kann für die WW-Versorgung direkter Nachbarn (Wohnheim, Akademie) verwendet werden



Grundriss: Dachgeschoss

Energie und Anlagenkonzept

02

Kaum Sonne aber trotzdem warm

Bei der Konzeption des Speichermanagements ist das Ziel den Vorrang auf die solar bereit gestellt Heizenergie zu legen.

- Durch die Verwendung von Luft als Heizenergieträger ergibt sich der Vorteil, dass die Vorlauftemperaturen im Verhältnis zu konventionellen Heizungen sehr tief sein können
- Weiterer Vorteil ist eine sehr schnelle nutzergerechte Lastanpassung
- Durch eine Reihenschaltung der Luftwärmetauscher (dezentrale Nacherhitzer in den Räumen mit max. 35°C bzw. zentraler Vorerhitzer mit max. 25°C) erreicht man, die für eine optimale solare Nutzung notwendige niedrige Rücklauftemperatur.
- Dabei gilt grundsätzlich, je geringer die Rücklauftemperatur, desto höher wird der Wirkungsgrad der Solaranlage

Fenster zu aber Luft rein

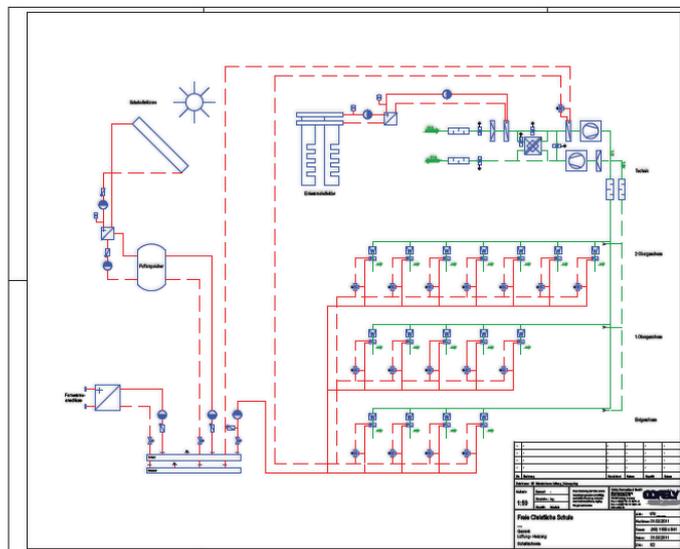
Die herkömmliche Fensterlüftung geht mit massiven Wärmeverlusten einher. Und genau das steht im grossen Widerspruch zu der Notwendigkeit ausreichend Frischluft zur Verfügung zu haben.

- Ein geregelter Be- und Entlüftung übernimmt den Luftaustausch
- Eine hocheffiziente Wärmerückgewinnung vermindert Wärmeverluste
- Auf statische Heizflächen kann verzichtet werden
- Die Volumenströme werden an die Anwesenheit von Personen bzw. an den Unterricht/Stundeplan angepasst

Wärme aus der Erde

Bei frostigen Außentemperaturen besteht die Gefahr des Einfrierens der Wärmerückgewinnung und damit des Ausfalls der Lüftungsanlage. Je effizienter die Anlage, desto schneller kommt es zur Vereisung.

- Die Vorheizung der frostigen Außenluft mit Erdwärme verhindert die Vereisung
- Ein erwünschter Nebeneffekt ist die Ausnutzung der Erdwärme ohne Einsatz einer Wärmepumpe
- Der Verzicht auf wassergefährdende Inhaltsstoffe des Erdkollektors erlaubt sogar den Einsatz in Wasserschutzgebieten
- Als weiterer erwünschter Nebeneffekt ergibt sich die Möglichkeit den Erdkollektor im Sommer zur Kühlung der eingeblasenen Frischluft zu nutzen



Schaltschema Lüftung/Heizung

Innovative Technologien und Strategien

03

III. Beheizung der Räume

Für die Beheizung der Räume wird die, soweit notwendig, Lüftungsanlage verwendet. Dadurch werden Investitionskosten und Energie gespart.

Beheizung der Außenluft in drei Schritten

(1) Erdwärmetauscher

Vorgesehen ist ein Sole-Erdwärmetauscher. Dieser soll die Außenluft auf min. 3 °C vorwärmen und in Sommer auf ca. 24 °C kühlen. Damit wird erneuerbare Energie genutzt und verhindert, dass die Forluft durch die Wärmerückgewinnung zu viel abkühlt und verrostet. Dafür werden neben und unter dem Gebäude in ca. 1,5 m Tiefe (dafür die sowieso erforderliche Baugruppe: gezeugt) ca. 3000 m Kunststoffrohre (DN 25-32) verlegt, durch die Wasser mit Frostschutzmittel zirkuliert und über einen Wasser-/Luftwärmetauscher die Außen-/Zuluft je nach Bedarf geheizt oder gekühlt wird.



(2) Wärmerückgewinnung

Über einen Kreuzstromwärmetauscher wird von der Abluft Wärme auf die Zuluft übertragen und damit die Temperatur von ca. 5 °C auf ca. 17 °C erwärmt.

(3) Solarwärmeranlage

Solarkollektoren Fläche ca. 100 m² werden auf dem Flachdach, mit einem Neigungswinkel von 60°, montiert und ein ca. 10 m³ Wassenspeicher (aufgestellt auf mehrere Speicher), mit der entsprechenden Hydraulik und der MSX-Technik installiert. Die Optimierung der Kollektorfäche, des Speichervolumens, dessen Aufteilung, der hydraulische Einbindung und das Steuer- und Regelungsmanagement ist eine wichtige Aufgabe der Ausführungsplanung. Dabei ist auf einen möglichst effektiven Energieeinsatz (Strom und Wärme) zu achten.

Lufterwärmung in 3 Stufen

- Außenluftvorwärmung durch Erdwärmetauscher unter Bodenplatte (2000m PE-X-Rohre)
- Hocheffizienter Kreuzstromwärmetauscher um die verbrauchte Abluftenergie zurückzuführen
- 100qm Solarwärmanlage erwärmen die Nachheizregister der Lüftung auf Einblasttemperatur
- Optionale Kühlfunktion im Hochsommer durch Außenluftabkühlung durch den Solauswechsler

badenova
gefördert durch den
Badenova Innovationsfond

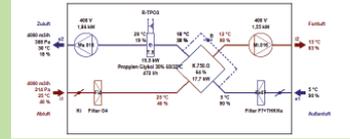
Frische Luft für die Schule

- kontrollierte Be- und Entlüftung aller Räume
- Präsenzbabhängige Steuerung der Lüftung und der Beleuchtung (Schulbetrieb, Standby, Absenkung)
- Funktionsabhängige Regelung der Lüftung (Umluftbetrieb bei Wärmebedarf in Abwesenheit, Frischluftzufuhr vor und während Unterricht oder bei Veranstaltungen im Multifunktionsraum)
- intelligente energieeffiziente Regelung der Lüftungsmotoren

IV. Betriebsarten

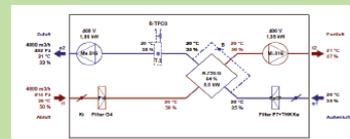
(1) Winterbetrieb

(angegebene Temperaturen bei -10, die Außenluft wird vom Erdwärmetauscher auf 5 °C vorgewärmt)



(2) Sommerbetrieb

(angegebene Temperaturen bei 30, die Außenluft wird vom Erdwärmetauscher auf 20 °C gekühlt)



Luftführung:
Die Zuluft wird von der zentrale auf dem Dach über Kanäle in die Nutzräume geführt, von dort durch Überströmelemente mit Schalldämmung und Brandschutzklappen in den Fluren, WC's und Nebenräumen durch Kanäle zum Lüftungsgerät zurück geführt.

Schema Luftaufbereitung

Projektbearbeitung: Erich Schrank (Bauherr Freie Christliche Schule Freiburg, Paul Frener (Energie-Global), Torsten Munkelt (Cofely)

COFELY
GDF SVEZ

Freie Christliche Schule
Schule Freiburg, www.fcschule.de

Aus einem Guss

Bekanntlich ist das Ganze immer mehr als Summe seiner Bestandteile. Das gilt in besonderem Maße gerade für energieeffizientes und klimaneutrales Baugen. Gebäudehülle, Anlagentechnik und Nutzerverhalten müssen eine Einheit ergeben.

- Auflösung des Zielkonflikts von dichten, gut gedämmten Gebäuden und der erwünschten gesunden Luft für die Nutzer
- Einbeziehung der bestehenden Gegebenheiten wie z.B. eigener Bestandsgebäude und deren Technik bietet oftmals Möglichkeiten Solarenergie effizienter zu Nutzen (Wärme und Strom)

Es werde Licht ...

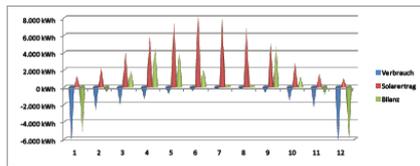
Um den unwirtschaftlichen Primärstrombedarf bei der Beleuchtung in Grenzen zu halten wurden bei deren Umsetzung auf einige Punkte mehr Gewicht gelegt.

1. Zum Ersten soll grundsätzlich die Beleuchtung mittels hocheffizienter LED-Leuchten (z.T. mit DALI-Vorschaltgeräten) realisiert werden. (Hierzu sollen T8-LED Leuchten und LED-Downlights verwendet werden).
2. Zum Zweiten erfolgt die Zu- und Abschaltung von Licht nicht nur über Präsenzmelder, sondern die Klassenzimmer werden mit 2-kanaligen Meldern (Fenstergruppe, Raumgruppe) ausgestattet, welche die fensternahen Beleuchtungsgruppen, bei ausreichend vorhandenen natürlichen Licht, abschaltet.
3. Zudem verfügen die eingepplanten Melder über einstellbare Lichtwerte, bei deren Überschreitung eine Abschaltung konfigurierbar ist (z.B. Flure, Foyers, Treppenhäuser)

Kennwerte und Optimierung

04

Energiebilanz (Solarertrag)



Bilanzbetrachtung der Heizungsenergie

Optimierungspotential

Betrachtet man den Temperaturverlauf der Klassenzimmer, so stellt man leicht fest, dass ein beträchtlicher Gewinn darin liegt, die Aufheizung der Räume an die Stundenpläne zu koppeln.

1. Es kann die Raumheizung nach Unterrichtschluss komplett abgesenkt werden (Umluftbetrieb bei Aufheizung).
2. Wie dem Temperaturverlauf im Klassenzimmer zeigt (rote Linie im Schaubild), ist der Raum nach Unterrichtsende mind. noch 1-2 Stunden auf Betriebstemperatur. Ein Abschalten der Nachheizung 1-2 Stunden vor Unterrichtsende zieht keinerlei Komfortverlust, sondern ausschließlich eingesparte Heizenergie nach sich.

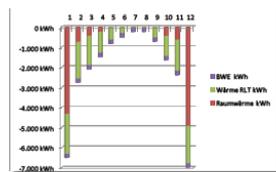


gemessener Temp.-verlauf im Klassenzimmer (Feb. 2010)

badenova
gefördert durch den
Badenova Innovationsfond

Unter Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung der Abluft ergibt sich für die Energiebilanz die im Schaubild dargestellte Situation:

- es wird lediglich für die Monate Dezember und Januar eine nennenswerte Fremdenergiezufuhr benötigt
- in den Monaten März bis Mitte Juni und Mitte September bis Oktober steht der Großteil der solaren Überschuss-Energie als Heiz-Energie dem Bestandsgebäude zur Verfügung
- und in schulfreien Sommermonaten steht die Überschuss-Energie dem benachbarten Wohnheim zur Erwärmung des Warmwassers zur Verfügung
- rechnerisch ergibt sich ein positiver Wärmeertrag von ca. 5.600 kWh/Jahr



Energiebedarf an Heizung und WW

Werte, die der Berechnung zugrunde lagen:

- Luftvolumen ca. 7000 m³/h
- Lüftungsdauer ca. 10 h/Tag, 18Tage monatlich
- Temperaturdifferenz 5- 15°C
- Erdwärmetauscher erwärmt die Luft auf min. 3°C
- Wirkungsgrad der Kreuzstromtauscher > 75%
- Verbrauch an WW ca. 300 l/Tag, an 18 Tagen im Monat (Temp-Differenz von 12°C auf 52°C)
- Kollektorwirkungsgrad 50%
- Kollektorfläche 100 qm

Simulationen

Da es für das vorgestellte Projekt keine passenden Simulationsprogramme gibt, wurden in der Vorplanung verschiedene Simulationsprogramme und eigene Berechnungen zusammengefasst um plausible Ergebnisse zu erhalten:

- Wärmebedarfs- und Verbrauchssimulation wurden mit dem Programm Casanova durchgeführt
- Die thermische Solaranlage und Pufferauslegung wurde mit GET-Solar berechnet bzw. dem Berechnungsprogramm der Fa. Jenne (CH) ausgelegt.
- Die Zusammenfassung der Ergebnisse wurde mit eigenen Tabellenkalkulationstabellen erstellt
- Für die Vorbereitung des Wettbewerbs wurde das Projekt auch mit der Software EnerCalc durchgerechnet

Im Zuge der Ausführungsplanung sind folgende Simulationen geplant:

- Thermische Gebäudesimulation
- Anlagensimulation (Lüftung und Solaranlage)

Projektbearbeitung: Erich Schrank (Bauherr Freie Christliche Schule Freiburg, Paul Frener (Energie-Global), Torsten Munkelt (Cofely)

COFELY
GDF SVEZ

Freie Christliche Schule
Schule Freiburg, www.fcschule.de

4.2 Flyer, Presse, Veröffentlichungen

Es wurden zumindest zwei Presseartikel in denen das Projekt erwähnt wurde (Grundsteinlegung, Einweihung) erstellt. Zu den nach wie vor jährlich stattfindenden zwei bis drei Gebäudeführungen für die neuen und an der Schule interessierten Eltern, wurde eine Plakatmappe erstellt anhand derer das Projekt und dessen Ziele erläutert werden.

Für die Teilnahme des Projekts am Klimaschutzpreis der Stadt Freiburg wurde im Februar 2015 im Rahmen der G.E.T.E.C. durch die Schulbürgermeisterin Gerda Stuchlik eine Anerkennungsurkunde mit einer Prämierung überreicht. Dort wurde das Projekt ebenfalls vor vielen Interessierten präsentiert.

5 Ausblick (Gedanken)

Es gibt einige Punkte, die kurzfristig umgesetzt werden müssen, andere sind mittelfristig machbar und wieder andere bleiben vielleicht einfach Wunschdenken:

Da wäre zunächst die Installation von Flächenheizkörpern in den beiden Fluren um die sie im Winter besser erwärmen zu können.

Ein weiteres Thema sind die Oberlichter. In einer ersten Phase könnten in den Fluren die vorhandenen fest verglasten Oberlichter ausgetauscht werden. Dagegen ist die Umsetzung in den Klassenzimmern ist nicht so einfach, da es dort keine Oberlichter gibt.

Nach wie vor ist die größte Herausforderung in der Energiebilanz die erzeugte Energie langfristig zu speichern. Um die 300MWh Jahresverbrauch an Wärmeenergie in einer Art Saisonspeicher zu puffern würden wohl Speichergrößen von mindestens 10.000m³ erforderlich sein. Dies ist im Moment nicht wirtschaftlich sinnvoll umsetzbar.

Nachdem die Kosten für PV-Anlagen massiv gefallen sind und wir den Eigenverbrauch mit unserer bestehenden 30kWp-PV-Anlage noch nicht decken können, steht die Installation einer weiteren PV an. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen dazu deuten eine knappe Rentabilität an.

Weiter werden wir an der Optimierung arbeiten, insbesondere was die Verbindung von GLT und Lüftungsanlage betrifft. Derzeit müssen Veränderungen der Raumtemperaturen (z.B. Soll-Raumtemperatur: Sommer 20°C, Winter 22°C) in den einzelnen Räumen noch manuell gepflegt werden.

Auch sind nicht alle „Phänomene“ erklärt. Es sollten sich die Gewinne beim Erdkollektor in beiden Betriebsfällen (Kühlung/Vorwärmung) noch deutlich steigern lassen und plötzliche Verbrauchsspitzen bei der zugeführten Fernwärme vermeiden lassen



Zuletzt sei noch genannt, dass wir gegenwärtig dabei sind die Heizungssteuerung im Altbau zu sanieren. In der gegenwärtigen Ausführung sind die Fernwärmeregulierung und die Heizungsregelung komplett voneinander losgelöst und wirken auf keiner Ebene zusammen. Sie sind auch nicht in die Gebäudeleittechnik eingebunden.

Ein weiteres großes Betätigungsfeld stellt der Bestandsbau mit über 6000qm Nutzfläche dar: Der Bau stammt aus den späten 80er Jahren. Alleine die Sanierung der zahlreichen Fensterflächen würde ein enormes Energieeinsparungspotential bieten. Dafür sind jedoch größere Investitionen nötig, die sich langfristig sicherlich amortisieren.

6 Darstellung drei wesentlicher Erkenntnisse aus dem Projekt.

1.	Es gibt grundsätzlich durchaus Möglichkeiten zukunftsfähig und dennoch wirtschaftlich zu bauen. Aber es ist klar, dass für eine erfolgreiche Umsetzung solcher „Ideen“ durchdachte Konzepte, projektspezifische Planungsleistungen, sorgfältige Ausführung und ein kontinuierlich überwachter Betrieb sowie deren Auswertung und Umsetzung Hand in Hand gehen müssen.
2.	Aus Bauherrensicht stellen wir fest, dass sich der Mehraufwand für die Erarbeitung, Prüfung und Entscheidung der verschiedenen Konzepte, erhöhten Investition und das aufwendige Monitoring durch die bereits jetzt schon sichtbaren Ergebnisse auf jeden Fall gelohnt hat.
3.	Eine weitere Erkenntnis ist, dass eine gewisse Flexibilität notwendig ist, um sich während der Planungs-, Ausführungs- und Betriebsphase neuen Gegebenheiten anzupassen und sicherlich eine Bereitschaft Kompromisse einzugehen.