



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Gebäude

Schlussbericht vom 23. November 2016

Energetische Betriebsoptimierung Minergiegebäude Seifen-Sträuli der ZHAW in Wädenswil

Optimierung der Lüftung, Heizung und Kühlung des Minergiegebäudes RA (Seifen-Sträuli) mit Erdwärmesondenheizung und -kühlung sowie Komfortlüftung

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Life Sciences und
Facility Management

IFM Institut für
Facility Management



Kanton Zürich
Baudirektion

Impressum

Datum: 23. November 2016

Ort: Wädenswil

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

AWEL Abteilung Energie

CH-8090 Zürich

Auftragnehmer:

Institut für Facility Management, ZHAW

Grüntal, CH-8820 Wädenswil

www.zhaw.ch/ifm

Autoren:

Raffael Burgy, Institut für Facility Management, ZHAW, bury@zhaw.ch

Markus Hubbuch, Institut für Facility Management, ZHAW, hubb@zhaw.ch

Roman Obrist, temporärer Mitarbeiter ZHAW

BFE-Bereichsleitung: Adrian Grossenbacher, adrian.grossenbacher@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/401907-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	5
1. Zusammenfassung	6
1.1. Erfolg.....	6
1.2. Ausgangslage	6
1.3. Schwachstellen im Anlagenkonzept	6
1.4. Automation und neues Gebäudeleitsystem	6
1.5. Fehlkonfigurationen an der Anlage und deren Optimierung.....	7
1.6. Weitere Optimierungsmöglichkeiten	7
2. Résumé.....	8
2.1. Résultats	8
2.2. Situation initiale	8
2.3. Faiblesses du concept d'installation	8
2.4. Automatisation et nouveau système de commande du bâtiment	8
2.5. Configurations incorrectes de l'installation et de son optimisation	9
2.6. Autres possibilités d'optimisation	10
3. Riepilogo	11
3.1. Successo.....	11
3.2. Premessa.....	11
3.3. Punti deboli nel concetto dell'impianto.....	11
3.4. Automazione e nuovo sistema di gestione degli impianti tecnici dell'edificio	11
3.5. Configurazioni errate dell'impianto e relativa ottimizzazione	12
3.6. Ulteriori possibilità di ottimizzazione	12
4. Ausgangslage	13
5. Vorgehen und Methodik.....	14
6. Beschreibung und Ist-Analyse Gebäude RA	15
6.1. Nutzung.....	15
6.2. Gebäudehülle.....	15
6.3. Übersicht HLK-Konzept	15
6.4. Heiz- und Kühlsystem	16
6.5. Lüftungssystem	19
6.6. Anlagenautomation	20
6.7. Messkonzept.....	21
6.8. Bewertung der vorhandenen Anlage	22
7. Planungswerte und Betriebsdaten vor Optimierung	24
8. Simulationen	25

8.1.	Auslastung Bürobereich.....	25
8.2.	Wärme- und Kältebedarf.....	26
8.2.1.	3D-Modell.....	26
8.2.2.	Simulation Wärme- und Kältebedarf.....	28
8.3.	Beleuchtung.....	30
9.	Massnahmen zur Technikoptimierung.....	32
9.1.	Ergänzung Anlagenautomation.....	32
9.2.	Wärmezähler-Probleme.....	34
10.	Optimierung Lüftungsbetrieb.....	35
10.1.	Nacht und Wochenendabschaltung.....	35
10.2.	Umstellung auf Stosslüftung.....	36
10.3.	Optimierung der Zuluft Erwärmung.....	38
10.4.	Optimierung der Wärmerückgewinnung.....	38
10.5.	Ferienabsenkung.....	39
11.	Optimierung Wärmeerzeugung.....	40
11.1.	Verbesserung Bewirtschaftung des Wärmespeichers.....	40
11.2.	Hydraulik der Erdwärmesonden.....	42
11.3.	TABS.....	44
11.4.	Fussbodenheizung Wohnungen.....	44
12.	Optimierung Freie Kühlung.....	45
12.1.	Free Cooling.....	45
12.2.	Kältemaschine für Spitzenlast.....	45
12.3.	TABS.....	46
13.	Zusammenfassung der Einsparungen.....	48
13.1.	Bestimmung der Nennleistung Wärmeerzeugung.....	48
13.2.	Bestimmung JAZ.....	48
13.3.	Herleitung Ist-Werte nach Optimierung Erdsondenpumpe.....	49
13.4.	Energie für Kühlung.....	49
14.	Schlussfolgerungen.....	50
14.1.	Offene Fragen und Problemstellungen.....	51
14.2.	Weiteres Vorgehen.....	51
14.2.1.	JAZ Optimierung.....	51
14.2.2.	Integrierte Storensteuerung.....	52
14.2.3.	Regelung bei zwei Heiz-/Kühlsystemen.....	53
14.2.4.	Regeltechnik.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Erzeugerseite Heiz- und Kühlsystem.....	17
Abbildung 2: Schema Anschluss Lufterhitzer/-kühler an Heiz- (links) bzw. Kühlkreislauf (rechts).....	18
Abbildung 3: Schema Anschluss TABS an Heiz- (links) bzw. Kühlkreislauf (rechts).....	18
Abbildung 4: Schema Lüftungsanlage Hochschulräume	19
Abbildung 5: Display der Anlagenautomation	20
Abbildung 6: In der Arbeitszeit sind häufig 25 bis 30 Personen anwesend	25
Abbildung 7: Während knapp 15 % der Arbeitszeit werden 4 und mehr Sitzungszimmer benötigt.....	25
Abbildung 8: Etwa 5 Arbeitsplätze belegen Personen welche in Sitzungen sind	26
Abbildung 9: Sitzungen meist 2 (hellgrün), oft auch mit 3 bis 5 Personen (dunkelgrün)	26
Abbildung 10: Aussendarstellung des 3D Modells des RA an einem Sommertag um 12.00 Uhr	27
Abbildung 11: 3-D-Modell Gebäude RA mit massiven Bauteilen.....	27
Abbildung 12: Jahresdauerlinie der thermischen Leistung für die Wärme (rot) und die Kühlung (blau).....	28
Abbildung 13: Jahresdauerlinie der elektrischen Leistung für Wärmepumpe (rot) und freie Kühlung (blau).....	29
Abbildung 14: Falschfarbendarstellung der Simulation des Tageslichts	30
Abbildung 15: Falschfarbendarstellung der Simulation der Arbeitsbeleuchtung	30
Abbildung 16: Legende der Falschfarben	30
Abbildung 17: Ausschnitt des Institutsbüros simuliert bei Tageslicht.....	30
Abbildung 18: Darstellung Lüftungszonen im Gebäudeleitsystem.....	33
Abbildung 19: Darstellung Temperaturmessungen im Gebäudeleitsystem	33
Abbildung 20: Synoptisches Schema der Anlage mit (gelb) Fehlströmung.....	34
Abbildung 21: Verlauf Tages-Energieverbrauch der HLK Anlage	35
Abbildung 22: Verlauf der CO ₂ Konzentration im Bürobereich vor und nach Einführung Stosslüftung	37
Abbildung 23: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit im Bürobereich vor und nach Einführung Stosslüftung	37
Abbildung 24: Ein- Ausschaltvorgänge der zwei Wärmepumpen und Speichertemperatur	40
Abbildung 25: Ein- Ausschaltvorgänge der zwei Wärmepumpen und Speichertemperatur nach der Parameteranpassung	41
Abbildung 26: Verbrauch an elektrischer Energie der Erdsondenpumpe	43
Abbildung 27: Bisheriger Betrieb Kältemaschine über zwei Tage	46
Abbildung 28: Kühlen mit TABS und heruntergehängter Decke	47
Abbildung 29: Temperaturmessung im Kühlmodus im Büro	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich Energiebedarf Minergieantrag und Ist-Werte vor Optimierung	24
Tabelle 2: Vergleich Energiebedarf Minergieantrag, Ist-Werte vor Optimierung und Simulation.	29
Tabelle 3: Lauf- und Pausenzeit der Lüftung	36
Tabelle 4: Einsparungen Lüftungssystem mit Stosslüftung gemäss Tabelle 3.....	36
Tabelle 5: Gegenüberstellung aller Energiekennzahlen vor und nach der Optimierung sowie der Planung	48

1. Zusammenfassung

1.1. Erfolg

Die zu Beginn des Projekts vorgefundene Konfiguration der HLK-Anlage benötigte im Durchschnitt 300 kWh elektrische Energie pro Tag, nicht eingerechnet die elektrische Betriebsenergie der Wärmepumpen. Mit im Wesentlichen drei Massnahmen konnte dieser Bedarf auf etwa 85 kWh pro Tag reduziert werden. Bei einem Strompreis von 14 Rp./kWh entspricht dies jährlichen Einsparungen von über 15 000 CHF bei Gesamtkosten des Projekts von 50 000 CHF. Die gesamten Einsparungen zeigt die Tabelle 5 im Kapitel 13 auf Seite 48.

1.2. Ausgangslage

Das Minergie zertifizierte Gebäude Seifen-Sträuli in Wädenswil wurde von einem privaten Investor erstellt und beinhaltet in den unteren Geschossen ein Auditorium, Schulräume sowie einen Bürobereich im 3. Stock. Dies wird alles von der ZHAW genutzt. Im Attikageschoss sind 4 Mietwohnungen vorhanden, welche vom Besitzer direkt vermietet werden. Die Energiebezugsfläche der ZHAW beträgt 3954 m², die der Wohnungen 766 m².

Das Heizsystem basiert auf zwei Wärmepumpen und einem Erdwärmesondenfeld mit 20 Sonden mit je 250 m Länge. Die Wärmepumpen laden einen technischen Wärmespeicher mit 2500 l Fassungsvermögen auf.

Die Wohnungen verfügen über Bodenheizungen. Die Räumlichkeiten der ZHAW können sowohl mit TABS als auch mit der Lüftung beheizt werden. Alle drei Heizsysteme verwenden dazu das Heizwasser aus dem technischen Speicher.

Die von der ZHAW genutzten Räume können über die Lüftung wie auch über die TABS gekühlt werden. Als Wärmesenke wird das Erdsondenfeld genutzt. Falls dieses „Free Cooling“ nicht ausreichen würde, könnte noch eine Kältemaschine mit Kältespeicher zugeschaltet werden. Vom System entkoppelt sind Belüftung und Warmwasserbereitstellung der Wohnungen.

1.3. Schwachstellen im Anlagenkonzept

Die HLK-Anlage wies einige Schwachstellen in der Planung auf.

Zum einen ist eine Konstantvolumenlüftung eingebaut, was nicht zeitgemäss ist. Zum anderen wurde bei der Planung der TABS ein unglückliches Konzept gewählt. Für eine bessere Raumakustik wurde vollflächig eine abgehängte Doppeldecke aus gelochten Gipsplatten eingebaut. Dahinter befinden sich die Abluftgitter. Damit wird die Decke von der Raumluft entkoppelt, die Wirkung der TABS wird geschmälert.

Es wäre auch denkbar, dass alleine das Lüftungssystem die Raumtemperierung im Winter wie im Sommer ohne TABS übernehmen könnte.

Weiter konnte eine Überdimensionierung der Wärmepumpen und des Erdsondenfeldes festgestellt werden. Die Erdwärmesonden sind total 5000 m lang, obwohl ca. 2700 m genügt hätten. Daraus resultieren aber keine negativen Folgen. Im Gegenteil, die Erde kühlt im Winter weniger stark aus, was eine bessere Effizienz der Wärmepumpen zur Folge hat. Im Sommer kann mehr Free-Cooling-Kapazität genutzt werden.

1.4. Automation und neues Gebäudeleitsystem

Ein Automationssystem steuert die Anlage. Parallel dazu wurde ein simples Messkonzept umgesetzt, welches allerdings schlecht dokumentiert ist. Ein Wärmezähler war falsch konfiguriert. Einige Messgeräte wurden an einen Messbus angeschlossen, die Messwerte zentral gesammelt. Des Weiteren gab es einen Fehler in der Hydraulik des Heizsystems. Dadurch entstanden Fehlströmungen bei abgeschalteten Heizgruppen, was Fehlmessungen verursachte.

Das bisherige Automationssystem war nicht zweckmässig, da es keinen Fernzugriff und nur rudimentäre Datenanalysen erlaubte. Daher wurde in Übereinkunft mit dem Gebäudeeigentümer ein zusätzliches Gebäudeleitsystem angeschafft, welches den Anforderungen entspricht.

1.5. Fehlkonfigurationen an der Anlage und deren Optimierung

Durch Fehlkonfigurationen an der Anlage wurde viel Energie verschwendet.

Zu Beginn des Projekts konnte sehr schnell ein Dauerlüftungsbetrieb festgestellt werden. Dieser wurde als erstes gestoppt und die Betriebszeiten der Lüftungsanlage an die Nutzungszeiten des Gebäudes angepasst. Damit konnte der Verbrauch bereits auf 200 kWh pro Tag gesenkt werden.

Die Lüftungsanlage verfügt über fünf Zonen, wovon vier, völlig unzeitgemäss, für konstanten Volumenstrom ausgelegt sind. Lediglich in der Aula wird der Volumenstrom über eine CO₂-Messung bedarfsgerecht angepasst. Da die Vorlesungssäle, die Bürozone und die Durchgangszonen nicht immer voll besetzt sind, wird bei laufender Lüftung auf Auslegungsleistung in der Regel zu stark gelüftet. Dies führte während der Heizperiode zu trockenem Raumklima mit einer Luftfeuchtigkeit deutlich unter 20 %. Das Problem konnte mit einem Wechsel auf einen Stosslüftungsbetrieb gelöst werden. Heute läuft die Lüftungsanlage noch 6,5 Stunden pro Tag und schaltet mehrmals für 30 Minuten ab. Mit dieser Konfiguration sank die Luftfeuchtigkeit im letzten Winter nur selten unter 30 %. Im Gegenzug stiegen bei gut ausgelasteten Räumen die CO₂ Messwerte von durchschnittlich 600 ppm auf Werte zwischen 800 und 1000 ppm an. Mit dieser Massnahme sank der tägliche Energiebedarf um weitere 40 kWh.

Da die Wärme für das Gebäude mit zwei Erdreich-Wasser-Wärmepumpen erzeugt wird, konnte mit der Reduktion der Betriebszeiten der Lüftung auch der Wärmepumpenbetrieb reduziert werden. Eine Fehlkonfiguration der Wärmepumpen führte zu häufigem Ein- und Ausschalten. Schuld war eine Einstellung der Wärmepumpen, welche die Ansteuerung durch das Automationssystem übersteuerte. Bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C, was fast sofort der Fall war, schaltete sich die Wärmepumpe wieder aus. Diese Begrenzung in der Wärmepumpen-Steuerung wurde nun mit einer viel höheren Temperatur überschrieben, welche nie eintreten wird. Damit können die Wärmepumpen nun vom Automationssystem gesteuert werden und erreichen sinnvolle Laufzeiten.

Um negative Effekte der TABS im Zusammenspiel mit der Lüftung zu vermeiden, werden sie nur noch in der Nacht betrieben, und damit auch zur Niedertarifzeit. Die Vorlauftemperatur beträgt 24 °C im Winter und 20 °C im Sommer.

Die Erdsondenpumpe wurde mit einer konstanten Leistung von 3,2 kW betrieben, was sich in einer sehr kleinen Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf zeigte. Daher wurde die Leistung stark zurückgeregelt. Anstelle von durchschnittlich 66 kWh werden nur noch 5 kWh pro Tag verbraucht, eine Reduktion von fast 93 %.

Dank der Überdimensionierung des Erdsondenfelds erweist sich das „Free Cooling“ als sehr effektiv. Das „Free Cooling“ über die TABS verbraucht eine mittlere Leistung von etwa 0,95 kW \pm 10% und hat eine Kühlleistung von 25 kW, was einen COP von 26 ergibt. Die Kältemaschine wurde als Ergänzung zum „Free Cooling“ geplant, jedoch nie gebraucht.

1.6. Weitere Optimierungsmöglichkeiten

Aufgrund der bisherigen Arbeiten und Analysen können folgende weiteren Optimierungsmöglichkeiten identifiziert werden:

- Eine Ferienabsenkung der Lüftung
- Die Temperatur des Wärmespeichers ist zurzeit etwa 40 °C, da dies für die Fussbodenheizung benötigt wird. Kann man diese Temperatur absenken, arbeiten die Wärmepumpen noch effizienter.
- Eine Steuerung der Wärmepumpen anhand des Wärmebedarfs
- Vorlauftemperatur der TABS nach Wetterprognosen einstellen: Die TABS sind ein System mit langer Reaktionszeit und könnten somit zielgerichteter arbeiten.

Diese Massnahmen sollen im Verlauf der nächsten Jahre umgesetzt werden.

2. Résumé

2.1. Résultats

L'installation de chauffage, ventilation et climatisation telle que paramétrée au début du projet nécessitait en moyenne 300 kWh d'énergie électrique par jour, sans compter l'énergie d'exploitation des pompes à chaleur. En substance, l'introduction de trois mesures a permis de réduire ces besoins à environ 85 kWh par jour. Avec un prix de l'électricité fixé à 14 ct./kWh, cela représente une économie annuelle de plus de 15 000 CHF par année sur l'ensemble du projet dont les coûts s'élèvent à 50 000 CHF. Le total des économies réalisées est illustré dans le tableau 5 sous le chapitre correspondant aux économies, page 48.

2.2. Situation initiale

Le bâtiment Seifen-Sträuli, certifié Minergie et sis à Wädenswil, a été construit par un investisseur privé et comprend, aux niveaux inférieurs, un auditorium et des salles de cours ainsi qu'une zone de bureaux au 3^{ème} étage. L'ensemble de cet espace est occupé par l'Université des Sciences Appliquées de Zurich (ZHAW). En attique se trouvent 4 appartements mis directement en location par le propriétaire du bâtiment. La surface de référence énergétique de la ZHAW s'élève à 3 954 m², tandis que celle des logements s'élève à 766 m².

Le système de chauffage repose sur deux pompes à chaleur ainsi que sur un champ de sondes géothermiques composé de 20 sondes de 250 m de long chacune. Les pompes à chaleur alimentent un accumulateur de chaleur d'une capacité de 2 500 l.

Les appartements disposent de chauffages au sol. Les locaux de la ZHAW peuvent être chauffés tant par le système d'éléments de construction thermoactifs (TABS) que par le système de ventilation. Les trois systèmes de chauffage utilisent pour leur propre fonctionnement l'eau chaude provenant de l'accumulateur.

Les locaux de la ZHAW peuvent être climatisés tant par le système de ventilation que par le système TABS. Le champ de sondes géothermiques est utilisé comme dissipateur de chaleur. Si le système de refroidissement (free cooling) s'avérait insuffisant, il pourrait être complété par une installation de réfrigération avec système de stockage du froid.

L'aération et la préparation de l'eau chaude sanitaire des appartements sont découplées du système.

2.3. Faiblesses du concept d'installation

L'installation de chauffage, ventilation et climatisation témoigne de certaines faiblesses au niveau de la planification.

Premièrement, le système de ventilation est conçu selon un volume d'air constant, ce qui trahit un concept quelque peu dépassé. Deuxièmement, un concept regrettable a été choisi à l'étape de la planification du TABS. Pour une meilleure acoustique, le choix s'est porté sur un faux-plafond suspendu intégral pourvu de plaques de plâtre perforées, derrière lequel se cachent les grilles de prise d'air. Le plafond est donc découplé de l'aération des locaux, péjorant ainsi l'efficacité du TABS. Il serait également envisageable de tempérer les locaux par le seul système de ventilation en hiver comme en été, sans avoir recours au système TABS.

Il a par ailleurs pu être constaté que les pompes à chaleur et le champ de sondes géothermiques ont été surdimensionnés. Les sondes mesurent au total 5 000 mètres de longueur, alors qu'environ 2 700 mètres auraient été suffisants. Il n'en résulte toutefois aucun impact négatif. Au contraire, le terrain a tendance à moins se refroidir en hiver, ce qui se traduit par une meilleure efficacité des pompes à chaleur. En été, la capacité du free-cooling affiche une meilleure utilisation.

2.4. Automatisation et nouveau système de commande du bâtiment

L'installation est gérée par un système d'automatisation. Parallèlement, un concept de mesure simplifié a été mis en œuvre, qui se trouve, par ailleurs, être mal documenté. Un compteur de chaleur n'était pas correctement configuré. Certains appareils de mesures étaient connectés à un compteur

central rassemblant les valeurs mesurées. De plus, il y avait un dysfonctionnement dans l'hydraulique du système de chauffage, engendrant des erreurs de flux dans les groupes de chauffage à l'arrêt et provoquant de ce fait des mesures incorrectes.

Le système automatisé s'avérait inefficace étant donné qu'il ne permettait ni de commander le système à distance, ni d'établir une analyse fiable en raison des analyses de données rudimentaires. En conséquence, un nouveau système de commande du bâtiment répondant aux exigences déterminées a été acquis en accord avec le propriétaire du bâtiment.

2.5. Configurations incorrectes de l'installation et de son optimisation

La mauvaise configuration de l'installation a provoqué le gaspillage d'une grande quantité d'énergie. Dès le début du projet, on a rapidement pu constater un fonctionnement permanent de la ventilation. Une première étape a donc permis d'arrêter le fonctionnement de la ventilation en continu afin d'adapter les temps d'exploitation du système de ventilation aux temps d'occupation du bâtiment. La consommation a ainsi pu être diminuée à 200 kWh par jour.

Le système de ventilation dispose de cinq zones dont quatre sont paramétrées pour assurer un débit volumique constant, ce qui n'est plus du tout d'actualité. Le débit volumique est adapté en fonction des besoins uniquement dans la salle polyvalente (Aula) à l'aide d'un système de mesure du CO₂. Les salles de cours, la zone des bureaux et les zones de passage n'affichant pas toujours une occupation complète, la capacité visée en cas d'aération continue est en principe trop forte. Cela signifie, pendant la période de chauffe, un air ambiant trop sec avec un taux d'humidité clairement inférieur à 20%. Ce problème a pu être résolu en modifiant les paramètres d'exploitation de l'aération. A l'heure actuelle, le système de ventilation fonctionne 6,5 heures par jour et se met en arrêt à plusieurs reprises pour une durée de 30 minutes. Ce nouveau paramétrage a permis de mieux réguler le taux d'humidité présent dans l'air, qui est rarement descendu en-deça de 30% l'hiver dernier. En contrepartie, les locaux très fréquentés ont présenté des valeurs mesurées de CO₂ en augmentation, passant d'une moyenne de 600 ppm à des valeurs comprises entre 800 et 1 000 ppm. La mesure mise en place a permis de diminuer la consommation énergétique journalière de 40 kWh supplémentaires.

La chaleur pour le bâtiment étant produite à l'aide de deux pompes à chaleur sol-eau, le fait de réduire les temps d'exploitation du système de ventilation a également permis de réduire l'exploitation des pompes à chaleur.

La configuration incorrecte des pompes à chaleur provoquait des démarrages et des arrêts fréquents de l'installation. En cause, le paramétrage des pompes à chaleur qui prenait le pas sur le pilotage par le système automatisé. Une température de départ de 40°C, ce qui était presque toujours le cas, suffisait à ce que les pompes à chaleur se mettent à l'arrêt. Ce plafonnement dans l'exploitation des pompes à chaleur a été supprimé grâce à des consignes de températures beaucoup plus élevées, qui ne seront jamais atteintes. Les pompes à chaleur peuvent désormais être pilotées par le système automatisé pour atteindre des temps d'exploitation efficaces.

Pour contrer les effets négatifs du système TABS en interaction avec l'aération, celui-ci est enclenché uniquement durant la nuit, ce qui permet également de bénéficier de tarifs à bas coûts. La température de départ s'élève à 24°C en hiver et 20°C en été.

La pompe à chaleur à sondes géothermiques avait été paramétrée pour fonctionner à une puissance constante de 3,2 kW, ce qui se traduisait par une différence des températures de faible amplitude dans le circuit aller/retour. Le nouveau paramétrage a permis de réduire drastiquement la puissance de l'installation. Au lieu des 66 kWh consommés en moyenne chaque jour, l'installation ne consomme plus que 5 kWh par jour, ce qui représente une réduction de près de 93%.

Grâce au surdimensionnement du champ de sondes géothermiques, le free cooling s'avère très efficace. Le free cooling par le biais du système TABS consomme en moyenne une puissance d'environ 0,95 kW \pm 10% et affiche une puissance de refroidissement de 25 kW, ce qui donne un coefficient de performance (COP) de 26.

Une installation de réfrigération avait été planifiée en complément du free cooling, mais n'a finalement jamais été utilisée.

2.6. Autres possibilités d'optimisation

En se fondant sur les travaux et analyses effectués jusqu'ici, il est possible d'identifier les autres points d'optimisation suivants:

- Consignes de diminution de l'aération durant les périodes de vacances
- La température de l'accumulateur de chaleur se situe à l'heure actuelle à environ 40°C en raison du chauffage au sol. S'il était possible de diminuer cette température, les pompes à chaleur seraient plus efficaces.
- Pilotage des pompes à chaleur en fonction des besoins de chaleur
- Paramétrage de la température de départ du système TABS en fonction des prévisions météorologiques: ce système dispose d'un temps d'inertie relativement long et serait plus efficace si son fonctionnement était davantage ciblé.

Il est prévu d'introduire ces mesures d'optimisation dans le courant de l'année prochaine.

3. Riepilogo

3.1. Successo

La configurazione dell'impianto RVC elaborata all'inizio del progetto necessitava mediamente di 300 kWh di energia elettrica al giorno, esclusa l'elettricità d'esercizio delle pompe di calore. Attraverso essenzialmente tre misure questo fabbisogno è stato ridotto a 85 kWh al giorno. Con un prezzo dell'elettricità di 14 ct./kWh ciò corrisponde a un risparmio annuo di oltre 15 000 CHF a fronte di costi globali del progetto di 50 000 CHF. Il totale dei risparmi è riportato nella tabella 5 a pagina 48.

3.2. Premessa

L'edificio certificato Minergie Seifen-Sträuli di Wädenswil è stato realizzato da un investitore privato; ai piani bassi presenta un auditorium, aule di formazione e un'area destinata ad uffici al 3° piano. Tutti questi spazi sono utilizzati dalla ZHAW. Al piano attico vi sono quattro appartamenti locati direttamente dal proprietario. La superficie di riferimento energetico della ZHAW ammonta a 3954 m², quella degli appartamenti a 766 m².

Il sistema di riscaldamento si basa su due pompe di calore e un campo di 20 sonde geotermiche ognuna lunga 250 m. Le pompe di calore caricano un accumulatore termico tecnico con una capacità di 2500 l.

Gli appartamenti dispongono di riscaldamento a pavimento. I locali occupati dalla ZHAW possono essere riscaldati sia con i TABS che con la ventilazione. I tre sistemi di riscaldamento utilizzano l'acqua calda dell'accumulatore tecnico.

Anche per quanto riguarda il sistema di raffreddamento i locali utilizzati dalla ZHAW possono avvalersi sia della ventilazione sia dei TABS. Il campo di sonde geotermiche viene utilizzato come riduttore del calore. Se questo «free cooling» non fosse sufficiente, è possibile attivare una macchina del freddo con accumulatore.

L'aerazione e la produzione di acqua calda degli appartamenti sono separate dal sistema.

3.3. Punti deboli nel concetto dell'impianto

L'impianto RVC ha evidenziato alcuni punti deboli nella progettazione.

Da un lato è stato previsto un sistema di ventilazione a volume costante, non al passo con i tempi; dall'altro nella progettazione dei TABS è stato scelto un concetto inadeguato. Per migliorare l'acustica dei locali è stato posato su tutta la superficie un controsoffitto appeso formato da pannelli in gesso forati. Le griglie di scarico si trovano dietro al controsoffitto: in questo modo il soffitto viene separato dall'aria interna, riducendo l'efficacia dei TABS.

A regolare la temperatura delle stanze potrebbe anche essere esclusivamente il sistema di ventilazione sia in inverno che in estate, senza i TABS.

Inoltre si è constatato un sovradimensionamento delle pompe di calore e del campo di sonde geotermiche. La lunghezza totale delle sonde geotermiche è di 5000 m, mentre sarebbero stati sufficienti ca. 2700 m. Tuttavia questo non provoca conseguenze negative. Al contrario, la terra in inverno raffredda in modo meno intenso, il che accresce l'efficienza delle pompe di calore. In estate è possibile sfruttare una maggiore capacità di free cooling.

3.4. Automazione e nuovo sistema di gestione degli impianti tecnici dell'edificio

L'impianto è gestito da un sistema automatico. Parallelamente è stato attuato un semplice concetto di misurazione che tuttavia è scarsamente documentato. Uno dei contatori termici era configurato in modo errato. Alcuni apparecchi di misurazione sono stati collegati a un hub di misurazione che raccoglie i valori a livello centrale. Inoltre c'era un errore nell'idraulica del sistema di riscaldamento. In conseguenza di ciò si sono verificati flussi errati in gruppi termici spenti che hanno prodotto misurazioni errate.

Il precedente sistema di automazione non era adeguato, essendo sprovvisto di accesso a distanza e consentendo solamente alcune analisi rudimentali. Pertanto, d'intesa con il proprietario è stato acquistato un sistema di gestione degli impianti tecnici aggiuntivo che soddisfa i requisiti.

3.5. Configurazioni errate dell'impianto e relativa ottimizzazione

Le configurazioni errate dell'impianto hanno provocato un notevole spreco energetico. All'inizio del progetto è stato ben presto rilevato un esercizio permanente del sistema di ventilazione. Si è provveduto al suo blocco e all'adeguamento degli orari d'esercizio dell'impianto in base agli orari di utilizzo dell'edificio. In questo modo il consumo è stato ridotto a 200 kWh al giorno.

L'impianto di ventilazione dispone di cinque zone, di cui quattro con flusso volumetrico costante, una soluzione questa totalmente inadeguata rispetto ai tempi. Solamente nell'aula magna il flusso volumetrico viene adattato a seconda delle necessità attraverso una misurazione del CO₂. Poiché le aule dove si tengono le lezioni, l'area uffici e le zone di passaggio non sono sempre totalmente occupate, con l'impianto di ventilazione sulla potenza progettata solitamente la ventilazione risulta eccessiva. Durante il periodo di riscaldamento ciò provocava un'eccessiva secchezza dell'aria interna con un tasso di umidità inferiore al 20%. Il problema è stato risolto passando a una ventilazione sporadica. Attualmente l'impianto di ventilazione funziona 6,5 ore al giorno e si spegne più volte per 30 minuti. Con questa configurazione lo scorso inverno l'umidità dell'aria raramente è scesa al di sotto del 30%. Come contropartita nei locali molto sfruttati i valori rilevati di CO₂ sono passati da una media di 600 ppm a 800-1000 ppm. Grazie a questa misura il fabbisogno quotidiano di energia è diminuito di altri 40 kWh.

Poiché il calore nell'edificio viene prodotto da due pompe di calore terra-acqua, ridimensionando gli orari d'esercizio dell'impianto di ventilazione è stato ridotto anche l'esercizio delle pompe di calore. Una configurazione errata delle pompe di calore provocava frequenti accensioni e spegnimenti. La causa era un'impostazione delle pompe di calore che prevaleva sul sistema automatico. Con una temperatura di mandata di 40 °C, che veniva raggiunta quasi subito, la pompa di calore si spegneva nuovamente. Questa limitazione nella gestione delle pompe di calore è stata superata impostando una temperatura molto più elevata che non verrà mai raggiunta. In questo modo le pompe di calore possono essere comandate dal sistema automatico, con il risultato di tempi d'esercizio ragionevoli.

Per evitare effetti negativi, nell'interazione con la ventilazione i TABS vengono messi in funzione solo di notte, tra l'altro nella fascia a tariffa bassa. La temperatura di mandata è di 24 °C d'inverno e 20 °C d'estate.

La pompa delle sonde geotermiche era in funzione a una potenza costante di 3,2 kW, il che è emerso dalla differenza di temperatura irrisoria tra andata e ritorno. Pertanto la potenza è stata regolata su un livello di molto inferiore. Anziché mediamente 66 kWh vengono consumati solamente 5 kWh al giorno, con una riduzione di quasi il 93%.

Grazie al sovradimensionamento del campo di sonde geotermiche il «free cooling» è estremamente efficiente. Il «free cooling» mediante i TABS necessita di una potenza media di circa 0,95 kW \pm 10% e ha una potenza refrigerante di 25 kW, da cui risulta un COP di 26.

Progettata come integrazione al «free cooling», la macchina del freddo non è mai stata utilizzata.

3.6. Ulteriori possibilità di ottimizzazione

Sulla base delle analisi e dei lavori condotti sinora sono state individuate ulteriori possibilità di ottimizzazione, ossia:

- una riduzione della ventilazione durante le vacanze
- una riduzione della temperatura dell'accumulatore termico, attualmente di 40 °C per via del riscaldamento a pavimento, in modo da rendere più efficiente il funzionamento delle pompe di calore
- una gestione delle pompe di calore in base al fabbisogno di calore
- l'impostazione della temperatura di mandata dei TABS in base alle previsioni meteo: essendo un sistema dai lunghi tempi di reazione funzionerebbe in modo più mirato.

Queste misure dovrebbero essere attuate nei prossimi anni.

4. Ausgangslage

Das Gebäude Seifen-Sträuli in Wädenswil wurde von einem privaten Investor auf dem Areal einer alten Fabrik erstellt. Das Gebäude beinhaltet in den unteren Geschossen Schulräume, ein Auditorium und Aufenthaltszonen. Im 3. Stock ist zusätzlich ein Bürobereich untergebracht. Im Attikageschoss sind 4 grosszügige Mietwohnungen vorhanden. Die Energiebezugsfläche der Bereiche Schule und Büro beträgt 3954 m², die des Bereichs Wohnungen 766 m².

Die Schul- und Büroräume werden vom Kanton Zürich mit einem langfristigen Vertrag gemietet und von der ZHAW als Gebäude RA des Campus Reidbach für Unterricht genutzt. Ebenso sind im Bürobereich die Arbeitsplätze des Instituts für Facility Management im System Open Space, Shared Desk untergebracht. Die 4 Wohnungen werden vom Eigentümer direkt vermietet.

Für den Betrieb und die Wartung der gebäudetechnischen Installationen ist der Eigentümer verantwortlich, wie auch für die generelle Hauswartung. Das interne Facility Management der ZHAW ist für den Innenausbau der vom Kanton gemieteten Räume und für deren Reinigung zuständig.

Das Gebäude wurde im Sommer 2013 dem Eigentümer fertig erstellt und mit funktionierenden technischen Anlagen übergeben. In der Folge hat die ZHAW im September 2013 die Räume bezogen. Der Betrieb der Gebäudetechnik wurde nicht optimiert, bzw. die Anlagen wurden mit Standardeinstellungen resp. nach Angaben der Planer in Betrieb gesetzt. Aufgrund der Eigentumsverhältnisse gibt es keinen professionellen Betreiber der Gebäudetechnik.

Das Gebäude RA wurde mit einer sehr modernen Gebäudetechnik ausgestattet, es wurde aber auch auf tiefe Investitionen geachtet. Damit konnte für das Gebäude aufgrund der Planungsangaben auch ein Minergie®-Zertifikat erreicht werden.

Im ersten Betriebs- und Nutzungsjahr des Gebäudes funktionierten die technischen Anlagen insofern zufriedenstellend, als das Gebäude im Winter beheizt und im Sommer gekühlt werden konnte und die Anlagen soweit störungsfrei funktionierten. Es haben sich im ersten Betriebsjahr aber auch einige Komfortprobleme gezeigt. In den Schulräumen war es im Winter mit 20 °C bis 21 °C tendenziell zu kühl und gleichzeitig im Bürobereich mit bis 25 °C zu warm. Im Sommer war das Gebäude mit etwa 23 °C in den Schulräumen und dem Büro eher auf der kühlen Seite. Im Winter war die Luftfeuchtigkeit mit Werten unter 20 % rel. Feuchte sehr tief. Im Grossraumbüro hat dies zu Klagen der Institutsmitarbeitenden geführt. In der Folge wurde die Luftfeuchtigkeit mit drei Messgeräten erfasst. Von Dezember bis Februar zeigen alle Geräte eine Feuchtigkeit zwischen 10 % und 20 % rel. Feuchte an, was sehr trocken ist.

Erste Abklärungen zeigten, dass die Anlagen mit nicht optimalen Einstellungen betrieben werden und daher neben den Komfortproblemen auch ein grosses Energiesparpotential vermutet werden konnte. Der Gebäudeeigentümer zeigte sich von Anfang an sehr kooperativ und interessiert an einer Optimierung seiner Liegenschaft.

In der Folge wurde beschlossen ein Optimierungsprojekt zu starten, um den Komfort zu verbessern und die Anlagen energetisch zu optimieren. Da diese Probleme als typisch für moderne Minergie-Gebäude bezeichnet werden können, soll das Vorgehen mustergültig sein und mit Artikeln, Vorträgen und Berichten veröffentlicht werden. Daher unterstützen auch das AWEL Kanton Zürich und das BFE dieses Projekt.

5. Vorgehen und Methodik

Im Januar 2015 wurde das Optimierungs-Projekt gestartet. Mit dem Projekt wurden zwei Ziele gleichzeitig verfolgt. Einerseits sollte der Komfort für die Gebäudenutzer verbessert werden. Andererseits sollte der Energiebedarf des Gebäudes optimiert bzw. auf die prognostizierten Verbrauchswerte für Heizung und Lüftung gebracht werden.

In einem ersten Schritt wurde die Anlage begutachtet und die Funktion der einzelnen Komponenten erfasst. Es wurden die technischen Anlagen selbst und ihre Steuerung analysiert. Insbesondere wurde der Steuerung besonders viel Aufmerksamkeit geschenkt. Die Konfiguration und die Einstellung der Parameter wurde dann sorgfältig analysiert und hinterfragt. Bei diesen Arbeiten wurden verschiedene Schwachstellen entdeckt, es wurde eine Mängelliste erstellt.

Um den Gesamtenergiebedarf des Gebäudes besser zu verstehen wurden Simulationsmodelle erstellt. Gleichzeitig wurden die Minergie-Eingabe und die Planwerte studiert.

Im Bürobereich wurde mit Messungen der Temperatur und der Feuchtigkeit begonnen.

Zur Erfassung und Verbesserung des Komforts wurde eine Projektarbeit mit vier FM-Studierenden durchgeführt. Ihre Aufgabe bestand darin, das Klima in den verschiedenen Zonen des Gebäudes messtechnisch zu erfassen und das Empfinden des Klimas bei den Nutzern (Studierende, IFM-Mitarbeiter) abzufragen. Während der fünf Wochen dauernden Messungen wurden die Lüftungszeiten und Solltemperaturen in den Zonen im Wochenrhythmus verändert. Damit konnten Versuche gefahren werden um festzustellen, welche minimalen Lüftungszeiten aus Komfortaspekten noch gefahren werden können. Die Lüftung wurde dabei, da es sich um eine Konstant-Volumen-Anlage handelt, im intermittierenden Ein-/Ausbetrieb während der Nutzungszeiten der Räume gefahren. Ausserhalb der Nutzungszeiten wurde die Anlage ganz ausgeschaltet.

Um die Funktionalität der Anlage zu verstehen, musste das HLK-Schema in ein synoptisches Schema umgezeichnet werden. Auch musste erhoben werden, was die verschiedenen Stromzähler messen.

Um den Energiebedarf zu analysieren wurde ein Messdaten-Auswertungskonzept erstellt und es wurde begonnen, die vorhandenen Messstellen abzulesen. Die Messwerte wurden ausgewertet um Verläufe und Kennzahlen berechnen zu können. Bei diesen Arbeiten kamen weitere Mängel zutage, die in der Folge behoben werden mussten.

Die Messwerte können nach Behebung der Mängel bei den Wärmezählern mit den Planungswerten und den Werten im Minergieantrag verglichen werden.

Da die Anlagen zu diesem Zeitpunkt erst 18 Monate alt waren, kamen der Austausch von Komponenten oder Umbauten der Anlagen von Anfang an nicht in Frage. Vielmehr standen Massnahmen der Betriebsoptimierung im Vordergrund. Trotzdem zeigte es sich in der Folge, dass einige Änderungen an den Installationen unumgänglich oder sinnvoll sind. Diese wurden umgesetzt.

Parallel wurden die Betriebszeiten und -Parameter optimiert, um den Betrieb energetisch zu optimieren und den Komfort zu verbessern. Da das Gebäude zum grossen Teil einzig durch die ZHAW genutzt wird und der Eigentümer den Projektbearbeitern freie Hand liess, konnten verschiedene Einstellungen erprobt werden, um die optimalen Parameterwerte zu finden. Das Gebäude kann so, im Rahmen der Aufrechterhaltung der Nutzbarkeit, als Versuchsobjekt genutzt werden.

6. Beschreibung und Ist-Analyse Gebäude RA

6.1. Nutzung

Wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, wird das Gebäude RA hauptsächlich von der ZHAW als Hochschulgebäude auf insgesamt 3954 m² genutzt. Die Hochschulnutzung kann in den Bürobereich des Instituts für Facility Management (IFM), die Aula für Veranstaltungen und die für die Lehre konzipierten Vorlesungs- und Aufenthaltsräume und Verkehrszonen aufgeteilt werden. Das Büro ist ganzjährig an Werktagen zu den üblichen Bürozeiten besetzt. Die Aula wird für Veranstaltungen und zu Prüfungszeiten benutzt und ist entsprechend wenig und unregelmässig genutzt. Sämtliche Vorlesungsräume sind tagsüber und wochentags Lektionen Weise besetzt. In den unterrichtsfreien Zeiten im Sommer und im Winter stehen diese Räumlichkeiten oft leer.

Im obersten Stockwerk nehmen 4 Mietwohnungen weitere 766 m² Energiebezugsfläche ein.

Die Nutzung in dieser Form war zur Bauzeit bereits bekannt und hätte eigentlich in der Planung berücksichtigt werden können.

6.2. Gebäudehülle

Das Minergie[®]-zertifizierte Gebäude RA verfügt erwartungsgemäss über eine qualitativ sehr gute Gebäudehülle. Die Aussenwände bauen sich aus 20 cm Beton und 20 cm EPS-Isolation auf. Aussen ist das Gebäude verputzt und innen sind die Wände als Sichtbetonwände gestaltet. Der U-Wert der Aussenwände beträgt 0,15 W/(m²K).

Sämtliche Fenster sind mit einer modernen Dreifachverglasung realisiert. Sie reichen vom Boden bis fast unter die Decke und sind 1,2 m breit und 2,5 m hoch. Weiter sind die Fenster auf Hüfthöhe horizontal geteilt, der obere Teil ist als öffentlicher Fensterflügel ausgestaltet. Insgesamt hat die Fassade einen Glasanteil von 30 %. Der U-Wert der Fenster beträgt 0,96 W/(m²K).

Die Dachfläche verteilt sich auf 758 m² Flachdach mit einem U-Wert von 0,12 W/(m²K) und 852 m² Terrassen mit einem U-Wert von 0,2 W/(m²K).

6.3. Übersicht HLK-Konzept

Die Anlagekomponenten sind wie folgt:

- Als Wärmeerzeuger sind zwei baugleiche Wärmepumpen installiert, deren Wärmequelle aus einem Erdwärmesonden-Feld besteht.
- In den Schul- und Büroräumen sind TABS vorhanden, im 2-Leiter-System mit einer gesamthaften Zone.
- Die Schul- und Büroräume werden mit einem Fix-Volumenstromsystem zonenweise belüftet (Komfortlüftung), mit Heiz-/Kühlregistern pro Zone.
- Ein zentrales Lüftungsgerät mit WRG und Filter konditioniert die Zuluft vor.
- Über die Zulufttemperatur kann die Raumtemperatur zonenweise beeinflusst werden.
- Gekühlt wird über das Erdwärmesondenfeld und die TABS sowie über die Zonen-Register der Lüftung.
- Die Wärme- und Kälteverteilung ist im 2-Leiter-System mit zentralem Change-Over realisiert, sowohl zu den TABS wie auch zu den Zonen-Heiz-/Kühlregistern.
- Für eine eventuell nötige Nachkühlung ist ein Kältekreislauf mit Kältemaschine installiert.

- Pro WC-Anlage in den Geschossen der Hochschule ist je ein separates Komfortlüftungs-Gerät installiert.
- Die Warmwasseraufbereitung für die Hochschulräume erfolgt mit dezentralen Durchlauferhitzern in einzelnen Nassräumen. In den allgemeinen Nassräumen ist nur Kaltwasser verfügbar.
- In den Wohnungen sind Bodenheizungen und je ein individuelles Komfortlüftungs-Gerät mit WRG vorhanden.
- Die Warmwasser-Erwärmung in den Wohnungen erfolgt mit individuellen thermischen Solarkollektoren und elektrischen Nachheizregistern.
- Auf die Wohnungen wird im Folgenden nur noch am Rande eingegangen, gar nicht mehr auf die Warmwasser-Erwärmung und die WC-Lüftungen.

6.4. Heiz- und Kühlsystem

Zur Wärmeerzeugung stehen zwei Wärmepumpen Typ Hoval Thermalia Dual 90 mit jeweils 90 kW thermischer Leistung zur Verfügung (in Abbildung 1 ist nur eine gezeichnet). Die Wärmepumpen sind an das Erdwärmesondenfeld angeschlossen.

Das Erdwärmesondenfeld besteht aus 20 Sonden à 250 m Länge mit Doppel-U-Schleifen pro Bohrung. Das ergibt insgesamt 5000 m Erdwärmesondenlänge. Verglichen mit einem spezifischen Richtwert für die Entzugsleistung bei Heizbetrieb von 50 W/m bei normalen Untergrund aus Festgestein (VDI 4640 Blatt 2) ist das recht grosszügig ausgelegt. Bei 135 kW Entzugsleistung ($P_{Entzug} = P_{Wärme} - P_{Wärme} / COP$) (angenommen COP = 4, $P_{Wärme} = 180$ kW) ergäbe sich mit dem Richtwert eine benötigte Länge von nur 2700 m. Im Minergieantrag wurde bei der Auslegungstemperatur von - 8 °C eine Heizleistung von 114 kW angegeben. Mit einem COP von 4 der Wärmepumpen sinkt die Entzugsleistung weiter auf 85,5 kW, was dann noch 1710 m Erdwärmesondenlänge entspricht. Die Erdwärmesonden sind also mitgenügend Sicherheitsreserve ausgelegt, sodass der Boden nie allzu stark abkühlen sollte. Eine langfristige Abkühlung kann auch mit der Regeneration im Sommer-Kühlbetrieb vermindert werden. Als Wärmeträgermedium im Erdwärmesondenkreislauf wird reines Wasser ohne Frostschutzmittel verwendet. Wasser als Wärmeträgermedium hat eine geringere Viskosität und eine höhere Wärmekapazität als Sole auf Glykohl-basis, wodurch mit weniger Pumpenergie mehr Wärme transportiert werden kann. Es ist zudem günstiger und umweltfreundlicher als die üblichen Solen. Es ist hier die richtige Wahl des Wärmeträgers.

Als technischer Wärmespeicher steht ein 2500 l fassender Speicher zur Verfügung. Ab diesem werden die folgenden Wärme-Verbraucher gespeist:

- Die TABS in Schul- und Büroräumen (eine Heizgruppe), mit max. 30 °C Vorlauftemperatur.
- Die Fussbodenheizung der Wohnungen, mit geplant max. 35 °C Vorlauftemperatur (die effektive Vorlauftemperatur ist aufgrund der Komfortansprüchen der Mieter höher).
- Die Nacherhitzer bzw. Nachkühler in den Zonengeräten der Lüftung.

Die Wärmeabfuhr im Sommer erfolgt primär über die Erdwärmesonden (Free Cooling). Es ist jedoch noch ein sekundärer Kältekreislauf mit einer Kältemaschine und Kältespeicher installiert. Dieser würde zum Einsatz kommen, falls die Kühlleistung über die Erdwärmesonden nicht ausreichen sollte. Die Kälte-Verbraucher sind:

- Die TABS in Schul- und Büroräumen (im 2-Leiter resp. Change-Over-System), mit einer konstanten Vorlauftemperatur im Kühlbetrieb von 19 °C.
- Die Nacherhitzer bzw. Nachkühler in den Zonengeräten der Lüftung (im Change-over-System), mit Soll-Zulufttemperatur von min. 19 °C im Grossraumbüro, min. 20 °C Vorlauftemperatur in den Zonen Schule 1, Schule 2 und Eingang; min. 18 °C in der Zone Aula.

Eine Erdwärmesonden-Pumpe mit Frequenzumformer transportiert das reine Wasser von den Erdwärmesonden zu den Wärmepumpen bzw. zum Wärmetauscher für das Free Cooling und dann wieder zurück zu den Erdwärmesonden. Diese Pumpe wird nachfolgend Erdsondenpumpe genannt.

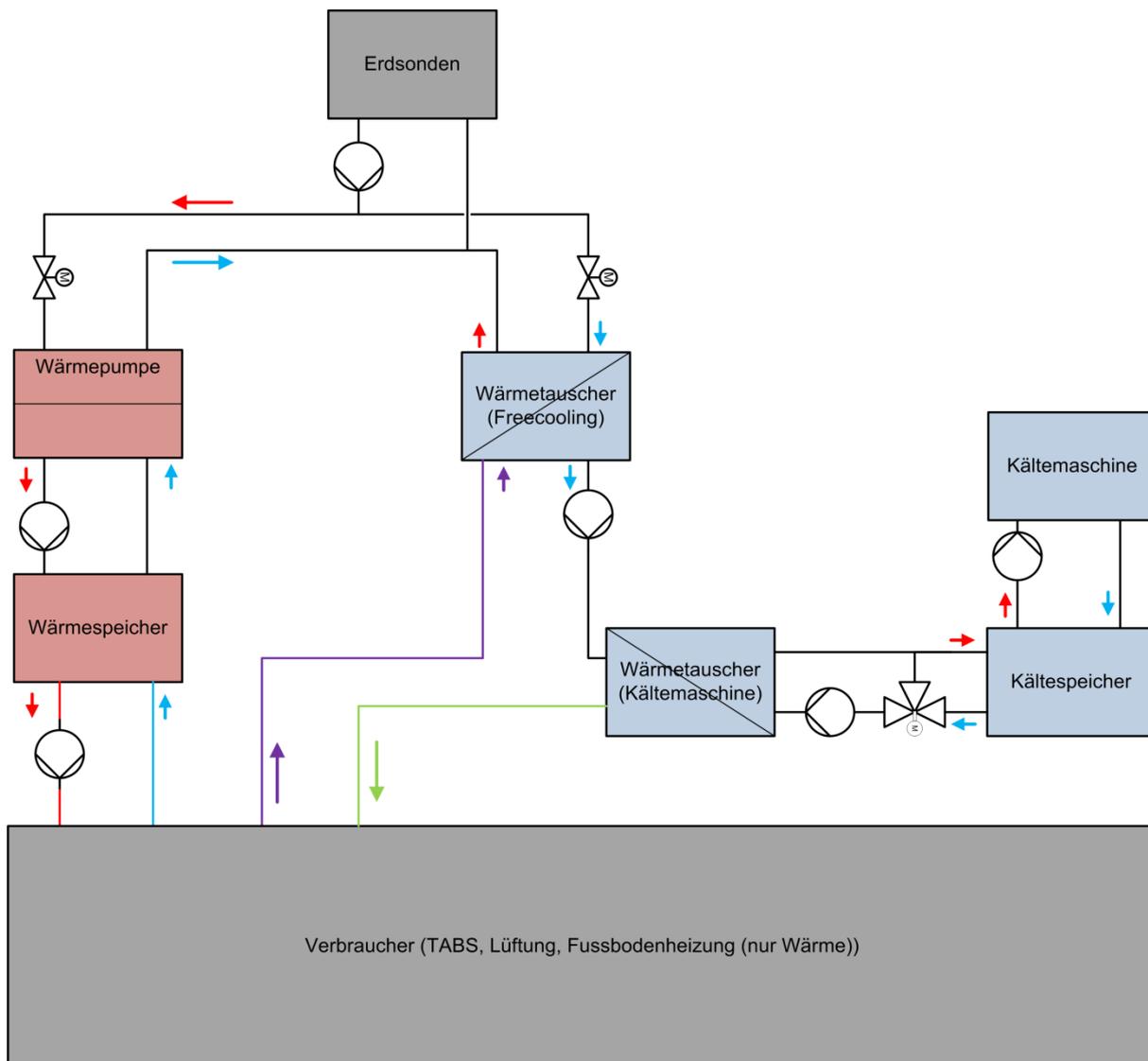


Abbildung 1: Übersicht Erzeugerseite Heiz- und Kühlsystem

Die Verbraucher sind über einen Verteiler mit Hauptpumpe in Einspritzschaltung mit Durchgangsventil an das Heiz- und Kühlsystem angeschlossen. Bei geschlossenem Heizventil bzw. Kühlventil zirkuliert der gesamte Volumenstrom über den Bypass zwischen Vor- und Rücklauf. Das bedeutet, dass der Volumenstrom auf der Verbraucherseite immer gleich bleibt und bei Bedarf über das Heizventil warmes Wasser bzw. kühles Wasser über das Kühlventil in den Kreislauf eingespritzt wird. Dadurch verringert sich dann der Volumenstrom über den Bypass um die eingespritzte Menge. Bei den Luftherzern/-kühlern ist dabei jeweils eine eigene Pumpe für den Heiz- und für den Kühlkreislauf eingebaut. Die STAD-Ventile sind Einreguliertventile für den hydraulischen Abgleich (siehe Abbildung 2). Der Aufbau in Abbildung 2 existiert im System insgesamt 5-mal. Jede Zone hat einen Nacherhitzer /-kühler und eigene Luftherhitzer- und -kühlerpumpen.

Die Fussbodenheizung ist nur an den Heizkreislauf angeschlossen, deshalb fehlt die linke Seite.

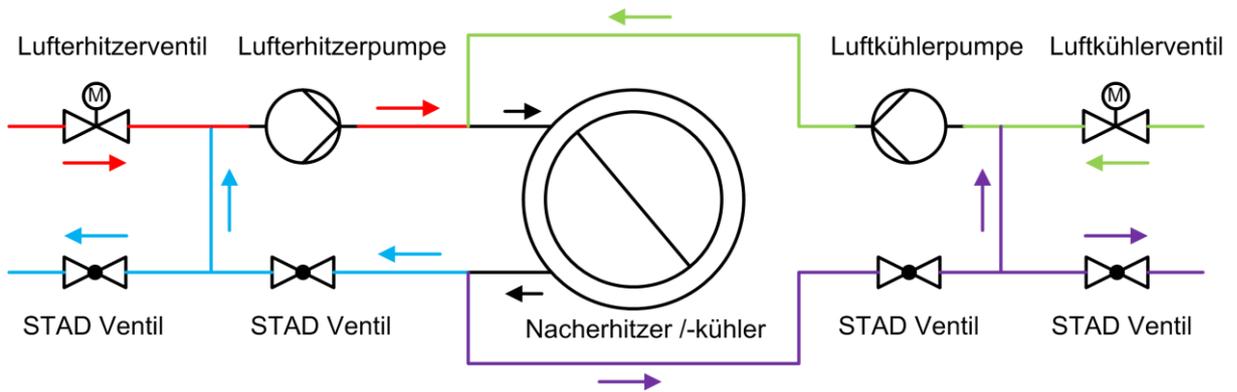


Abbildung 2: Schema Anschluss Lufterhitzer/-kühler an Heiz- (links) bzw. Kühlkreislauf (rechts)

Legende: Rot: Vorlauf Heizwasser, Grün: Vorlauf Kühlwasser, Blau: Rücklauf Heizwasser, Violett: Rücklauf Kühlwasser, Schwarz: Change-over

Die TABS sind anders angeschlossen, da dort die gleiche Pumpe für den Heiz- und den Kühlfall verwendet wird. Zudem verwenden der Heiz- und Kühlkreislauf denselben Bypass. Die TABS Pumpe wird hier für den Heiz- wie auch den Kühlfall verwendet (siehe Abbildung 3).

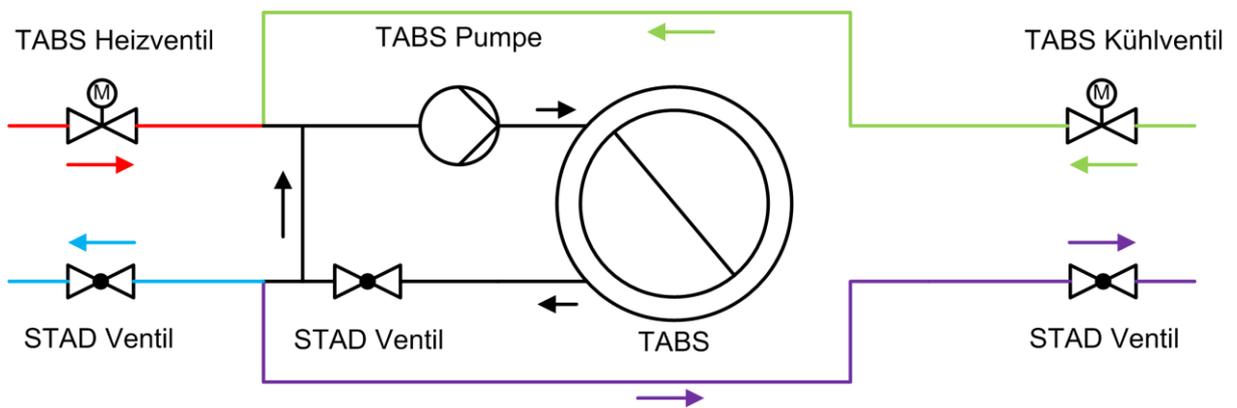


Abbildung 3: Schema Anschluss TABS an Heiz- (links) bzw. Kühlkreislauf (rechts)

Legende: Rot: Vorlauf Heizwasser, Grün: Vorlauf Kühlwasser, Blau: Rücklauf Heizwasser, Violett: Rücklauf Kühlwasser, Schwarz: Change-over.

6.5. Lüftungssystem

Die Hochschulräume des Gebäudes sind mit einer Komfortlüftung mit einem totalen Volumenstrom von knapp 30 000 m³/h ausgestattet. Die Zuluft wird in einem zentralen Monoblock vorkonditioniert. Die Aussenluft wird gefiltert, mittels eines Enthalpietauschers ein erstes Mal erwärmt (oder im Sommer gegebenenfalls vorgekühlt) und dann in den Zonengeräten mit den Nacherhitzern bzw. Nachkühlern auf die Solltemperatur gebracht. Der Zuluftventilator erzeugt einen konstanten Überdruck von 300 Pa, der Abluftventilator einen Unterdruck von 200 Pa. Beide Ventilatoren sind FU-geregelt (Abbildung 4).

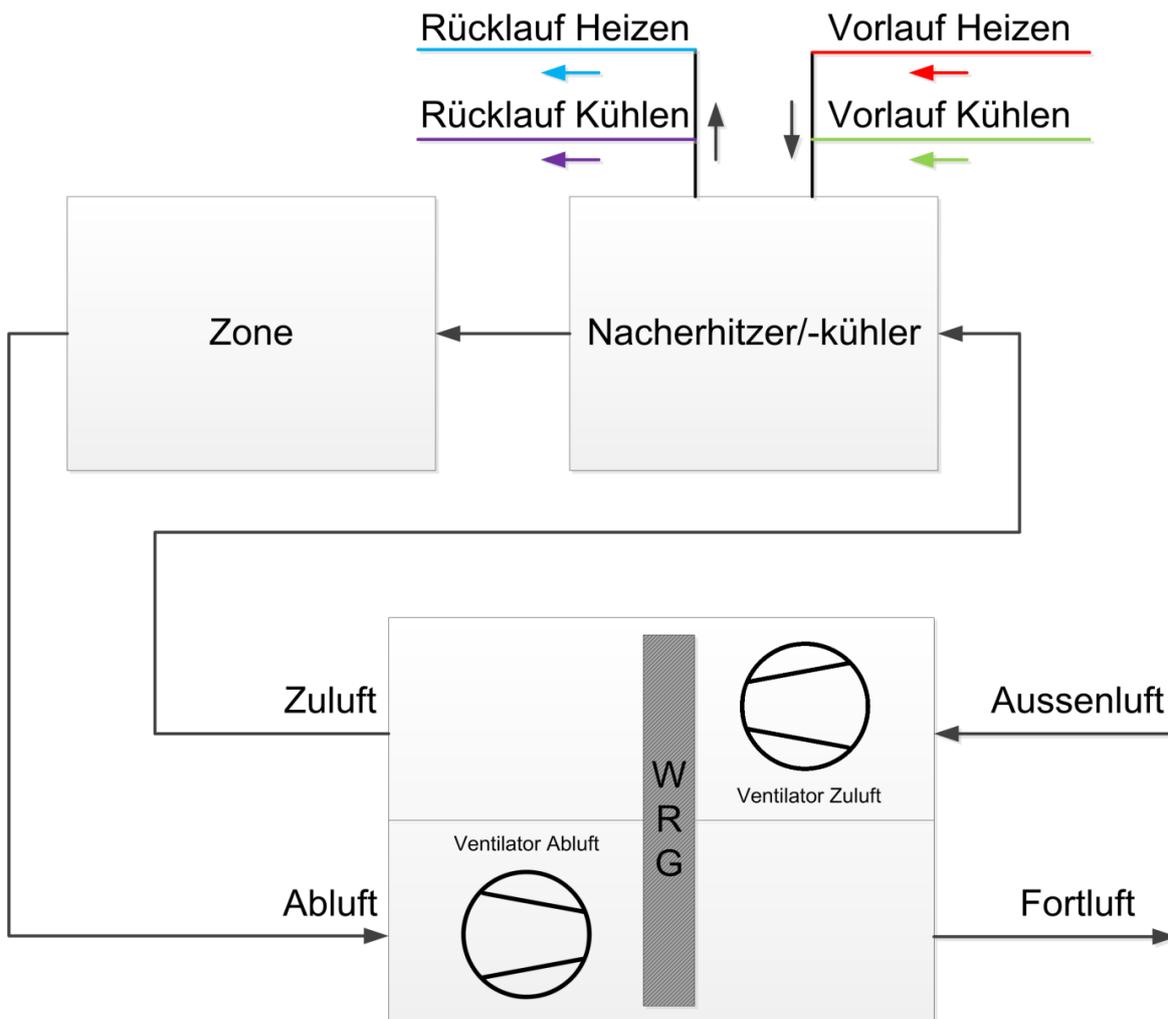


Abbildung 4: Schema Lüftungsanlage Hochschulräume

Das Gebäude ist in die 5 Lüftungszonen mit folgenden Zuluftmengen eingeteilt:

- Bürozone, 2010 m³/h
- Eingang, 1100 m³/h
- Aula, als einzige mit variablem Luftvolumenstrom, max. 5610 m³/h
- Schule 1, 6200 m³/h
- Schule 2, 14 100 m³/h

Für die verschiedenen Zonen können verschiedene Temperatursollwerte für die Raumtemperatur eingestellt werden. Die Regelung versucht dann mittels der Zuluft die eingestellte Zonen-

Solltemperatur zu erreichen. Der momentane Ist-Wert der Zonentemperatur wird als Abluft-Temperatur der Zone gemessen.

Pro Raum ist eine fest einstellbare Zuluftklappe vorhanden, um einen einmaligen hydraulischen Abgleich der Luftmengen vornehmen zu können.

Im Gebäude sind zusätzlich in den Nass-Räumen individuelle Kleinlüftungsgeräte mit Zu- und Abluft und WRG installiert, um diese Räume be- und entlüften zu können.

6.6. Anlagenautomation

Für die Regulierung der Anlagen ist ein Anlagenautomations-System Typ DDC4200 der Firma kieback & peter vorhanden. Das System wurde mit einer Vor-Ort-Bedienstation ausgestattet. An diesem System können nach dem Einloggen mit Passwort auf einem Touch-Screen die Parameter für den Anlagenbetrieb abgelesen und verstellt werden. Zudem werden Messwerte gespeichert. Die gespeicherten Werte können in Form einer Kurve dargestellt werden, jedoch immer nur für einen Messwert (Abbildung 5).



Abbildung 5: Display der Anlagenautomation

Für die Optimierung der Anlage ist dieses System nicht zweckmässig, da ein Fernzugriff nicht möglich ist und Messwerte nicht exportiert werden können. Zudem fehlt eine Anlagen-Visualisierung. Auch eine vernetzte Raumautomation oder eine Leit- oder Managementebene ist nicht vorhanden.

6.7. Messkonzept

Es wurde offenbar ein einfaches Messkonzept entwickelt (das aber nicht dokumentiert ist) und es wurden einige Messstellen zusätzlich zu den erforderlichen Verrechnungszählern des Stromlieferanten eingerichtet.

Es sind folgende Wärmezähler installiert:

- Wärmezähler Lüftung, Typ NeoVac Supercal 531
- Wärmezähler Fussbodenheizung , Typ NeoVac Supercal 531
- Wärmezähler TABS, Typ NeoVac Supercal 531
- Zusätzlich ist noch jeweils ein Wärmezähler pro Wohnung zur Abrechnung der Heizkosten vorhanden.

Diese Wärmezähler waren nicht auf das Anlagen-Automatisierungssystem aufgeschaltet, sondern wurden offenbar für eine manuelle Ablesung vorgesehen.

Die Stromzähler sind gegliedert nach Teilen von Stockwerken und nach den wichtigsten Verbrauchern. Es sind folgende privaten Stromzähler vorhanden:

- 1. OG: West
- 2. OG: Ost,
- 2. OG: West
- 2. OG: Mitte
- 3. OG: Ost
- 3. OG: Mitte
- Aula + AV-Technik
- Vors. Abgänge Schule
- Wärmepumpe, Kältemaschine (ohne Erdsondenpumpe)
- HLK übriges (mit Erdsondenpumpe)
- Unterzähler Kälte
- Unterzähler Lüftung

Die Messwerte dieser Stromzähler werden über ein einfaches Bus-System an die zentrale Facility Management-Abteilung der ZHAW in Winterthur übertragen und dort gespeichert.

Zudem sind in der Elektrozentrale folgende Verrechnungszähler des Stromversorgers (EKZ) vorhanden:

- Allgemiestrom (HLK plus Verkehrszonen)
- Wärmepumpen, Kältemaschine
- Schule (Sammelzähler aller Stockwerke etc. der Hochschule)

Die Messwerte wurden bisher weder kontrolliert noch abgelesen noch in irgendeiner anderen Form beachtet. Die Energierechnungen des Stromversorgers wurden dem Mieter resp. dem Nutzer, hier also der ZHAW, zur Verrechnung weiter geleitet und dort in der zentralen Buchhaltung der ZHAW ohne weitere Abklärungen bezahlt.

Die 4 Wohnungen haben je einen eigenen Verrechnungszähler des Stromlieferanten in den Wohnungsverteiltern.

Um diese Messgeräte manuell ablesen zu können, ist ein Zugang zum Technikraum und zum Elektroraum notwendig. Bisher hatte nur der Eigentümer diesen Zugang, sowie das interne Facility Management für Notfälle. Um dieses Optimierungs-Projekt durchführen zu können, gewährt der

Eigentümer freundlicherweise seit Mitte März 2015 auch den Vertretern des IFM den Zutritt zu diesen Räumen. Entsprechend werden seit dem 11.05.2015 Ablesungen der Messgeräte vorgenommen.

Die Wärmezähler wurden nachträglich auf das Gebäudeleitsystem aufgeschaltet (siehe Kap.9.2) und können nun ebenfalls ausgelesen werden.

6.8. Bewertung der vorhanden Anlage

Die Bestandesaufnahme und Analyse der bestehenden Anlage zeigte folgende Mängel in der Einstellung der Betriebsparameter:

- Die Lüftung war auf Dauerbetrieb eingestellt, ohne jede Nacht- oder Wochenendabsenkung.
- Die Wärmerückgewinnung war auf eine Zuluft-Solltemperatur nach WRG von 16 °C eingestellt. Die Luft wurde in den Nacherwärmern dann aber auf die Raumsolltemperatur der entsprechenden Zone aufgewärmt.
- Die beiden Wärmepumpen schalteten viel zu oft ein und aus.
- Die Bewirtschaftung des technischen Speichers (Wärmespeicher) der Wärmepumpe schien nicht optimal zu sein.
- Die Wärmepumpe heizt auf die vom Speicher geforderte konstante Temperatur von 40 °C auf, obwohl von den Verbrauchern tiefere Temperaturen verlangt werden. Entsprechend wird dann in den Einspritz-Schaltungen wieder herunter gemischt. Dies vermindert die Leistungszahl (den COP) der Wärmepumpe.
- Die Erdsondenpumpe wurde konstant und mit zu viel Leistung betrieben.
- Der Kältespeicher wird von der Kältemaschine auf ca. 7 °C herunter gekühlt, obwohl im Kühlbetrieb so tiefe Temperaturen nicht benötigt werden.
- Die Kältemaschine ist immer wieder in Betrieb, auch wenn gar kein Kältebedarf besteht.

Diese Mängel im Betrieb können auch mit einer fehlenden Betriebsoptimierung erklärt werden.

Weiter wurden folgende Planungs-Mängel in der Konzeption der Anlage festgestellt:

- Die Lüftung ist auf einen konstanten Volumenstrom in den Zonen ausgelegt, d.h. die Volumenströme für 4 verschiedene Zonen können nicht angepasst werden. Einzig die Zone Aula arbeitet mit variablem Volumenstrom.
- Da die Anlage auf Konstant-Volumenstrom ausgelegt ist, ist die Zuluftmenge in den einzelnen Zonen meist zu hoch. Damit wird auch die Luftfeuchtigkeit im Winter (zu) tief.
- Unklar ist auch, ob nicht die Lüftung (so wie sie als Konstant-Volumenanlage konzipiert ist) alleine zur Beheizung (und ev. auch Kühlung) ausreichen würde.
- Die Decken (TABS) in den Hochschulräumen sind mit einer abgehängten Akustikdecke aus gelochten Gipsplatten vollständig abgedeckt und somit thermisch von der Raumluft entkoppelt.
- Die installierte Anlagenautomation ist für eine Betriebsoptimierung nicht geeignet.

Beim Betrieb der Anlage zeigten sich folgende Mängel:

- Die Räume können sowohl über die Lüftung als auch über die TABS beheizt und gekühlt werden. Es ist unklar, wie die “Aufgabentrennung” statische zu dynamischer Heizung resp. Kühlung erfolgt. Ein gleichzeitiges Heizen über die TABS und Kühlen über die Zuluft, resp., vice-versa, kann nicht ausgeschlossen werden.
- Es sind verschiedenen Messgeräte für Elektrizität und Wärme vorhanden, diese werden aber weder ausgelesen noch wird der Energieverbrauch irgendwie erfasst und bewertet.
- Es fehlt ein fachgerechter Regel- und Funktionsbeschreibung der technischen Anlagen.
- Es fehlt eine Dokumentation des Messkonzeptes.

7. Planungswerte und Betriebsdaten vor Optimierung

Die Planwerte des Gebäudes wurden den verfügbaren Unterlagen entnommen. Die Betriebsdaten basieren auf der Interpretation der vorhandenen Messdaten vor der Optimierung.

Für das Gebäude wurde wie üblich ein Energienachweis und im vorliegenden Fall auch ein Minergieantrag erstellt. Hier wurden die Energieverbräuche für Heizung, Klima und Lüftung berechnet.

Aus dem Minergieantrag können unter anderem die in Tabelle 1 aufgelisteten spezifischen Energiewerte und Leistungswerte für ein Jahr entnommen werden. Die hier wesentlichen Werte sind der Heizwärmebedarf des Gebäudes, der Strombedarf der Lüftungsanlage, der Wärmepumpe sowie für die Kühlung.

Anhand gespeicherter Daten der Wärmezähler im Gebäudeleitsystem (seit 25.09.2015 im Betrieb) und aufgrund der vom internen FM der ZHAW in Winterthur gespeicherten Daten der Stromzähler wurden die Betriebsdaten ausgewertet. Für den Strombedarf der Wärmepumpe, der Lüftungsanlage und für das Free Cooling konnten hier wertvolle historische Daten beschafft werden. Leider sind diese Datenreihen nicht vollständig.

Während der Auswertung der Wärmeverbräuche musste festgestellt werden, dass die Wärmezähler falsche Werte liefern. Deswegen wurde für die Ermittlung des Heizwärmebedarfes eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4,3 vor der Optimierung geschätzt. Diese wird als höher als im Minergieantrag angenommen, weil die Temperatur auf der Wärmequellenseite infolge der Überdimensionierung der Erdwärmesonden höher liegt.

	Minergie-Eingabe	Ist-Werte vor Optimierung
Spez. Heizwärme Q_h pro Jahr Nennleistung Wärmeerzeugung	29,4 kWh/m ²	73,1 kWh/m ²
	114 kW	180 kW
	gerechnet mit EBF = 4720 m ²	
Elektr. Energie Wärmepumpe Elektr. Leistung Wärmepumpe JAZ (Wärmepumpe)	7,2 kWh/m ²	17 kWh/m ²
	28 kW	41,9 kW
	4,09	4,3
gerechnet mit EBF = 4720 m ²		
Elektr. Energie Lüftung/Kälte Elektr. Leistung Lüftung/Kälte	5,26 kWh/m ²	19,4 kWh/m ²
	8,118 kW	10 kW
	gerechnet mit EBF = 3954 m ²	
Elektr. Energie Erdsondenpumpe Elektr. Leistung Erdsondenpumpe	0,48 kWh/m ²	2,6 kWh/m ²
	1,11 kW	3,2 kW
	gerechnet mit EBF = 4720 m ²	
*Elektr. Energie Freie Kühlung *Elektr. Leistung Freie Kühlung *alle Pumpleistungen	4,10 kWh/m ²	1,3 kWh/m ²
	- kW	4,1 kW
	gerechnet mit EBF = 3954 m ²	
Strombedarf Gebäude Total	17,04 kWh/m²	40,3 kWh/m²

Tabelle 1: Vergleich Energiebedarf Minergieantrag und Ist-Werte vor Optimierung

In Tabelle 1 ist jeweils angegeben, ob mit der EBF für das ganze Gebäude (4720 m²) oder nur mit dem Hochschulteil (3954 m²) gerechnet wurde.

8. Simulationen

Um mehr über das Verhalten des Gebäudes zu verstehen und um die Plandaten und Messwerte im Betrieb mit berechneten Daten vergleichen zu können, wurden Datenmodelle erarbeitet und verschiedene Simulationen durchgeführt. Diese wurden teilweise mit Hilfe studentischer Arbeiten realisiert.

Zu Beginn wurde die Belegung des Bürobereichs aus den Planungswerten abgeleitet. Anschliessend wurde das Gebäude mit einem 3D-Modell erfasst. Damit wurden weitere Modelle zur Simulation des Energiebedarfs erstellt. Zuletzt wurde die Beleuchtungssituation simuliert, wozu auch eine 3-D-Darstellung des Innenausbaus des Bürobereichs gehört.

8.1. Auslastung Bürobereich

Die Auslastung von Räumlichkeiten spielt eine grosse Rolle für die Energiebilanz eines Gebäudes. Ist ein Gebäude schlecht besetzt, steigt der Energieverbrauch pro Kopf an. Pro Gebäudenutzer muss im Durchschnitt mehr Raumvolumen beheizt, belüftet und beleuchtet werden. Damit steigen auch die Kosten pro Kopf in diesen und weiteren Bereichen, wie beispielsweise für die Miete.

Insbesondere im Bürobereich wird deshalb versucht, mit non-territorialen Konzepten den Platzbedarf pro Kopf zu optimieren. Aber wie viele Arbeitsplätze sind mindestens notwendig? Wie viele und wie grosse Sitzungszimmer werden benötigt? Solche und ähnliche Fragen stellen sich bei der Planung von Arbeitsplätzen.

Am IFM wurden in einem ersten Schritt einfache Algorithmen entwickelt um diese Fragen ansatzweise zu beantworten. Anhand weniger Charakteristika werden Mitarbeiterprofile entwickelt, mittels welchen entschieden werden kann, wie viele Stunden ein Mitarbeiter am Arbeitsplatz, in Sitzungen oder ausser Haus ist.

Für die Bürobereiche des IFM wurden diese Algorithmen getestet. Die grosse Herausforderung dabei ist die Anzahl der Mitarbeiterprofile und deren Ausgestaltung. Bei der Planung des RA wurde der Bürobereich für 42 Vollzeitäquivalente ausgelegt. Es gibt ein Sitzungszimmer für bis zu 12 Personen und drei Think Tanks für 2, maximal 3 Personen. Weiter kann der Kaffee- / Pausenraum für Gespräche genutzt werden.

Im Büroalltag zeigte sich ein Mangel an Sitzungsmöglichkeiten für kleine Gruppen von 3 bis 6 Personen. Mit den oben erwähnten Algorithmen und Mitarbeiterprofilen kann diese Knappheit bestätigt werden.

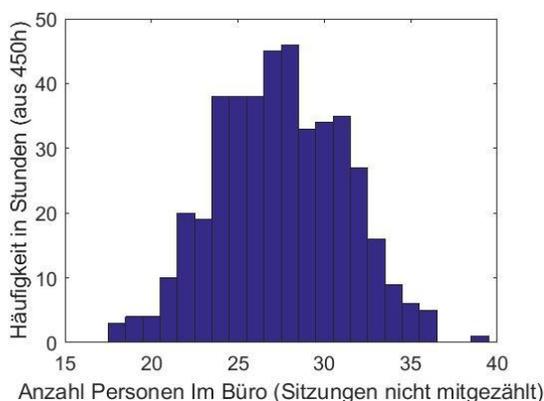


Abbildung 6: In der Arbeitszeit sind häufig 25 bis 30 Personen anwesend

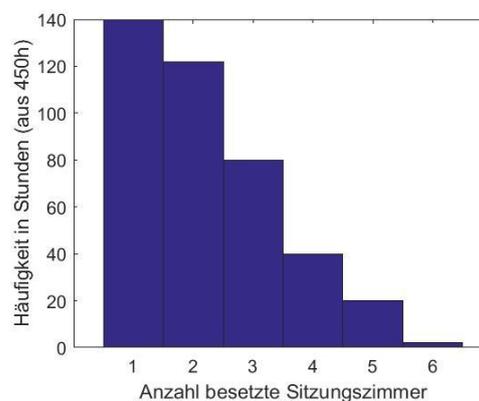


Abbildung 7: Während knapp 15 % der Arbeitszeit werden 4 und mehr Sitzungszimmer benötigt

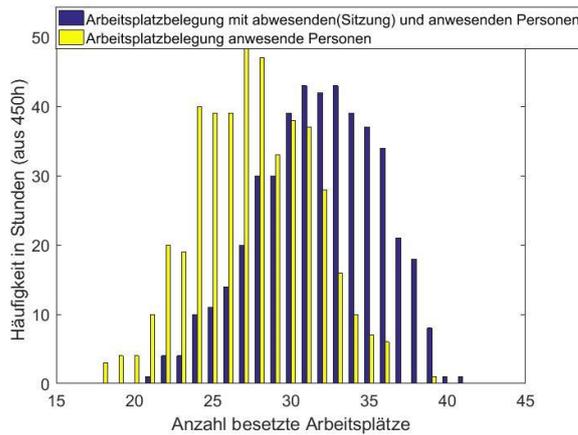


Abbildung 8: Etwa 5 Arbeitsplätze belegen Personen welche in Sitzungen sind

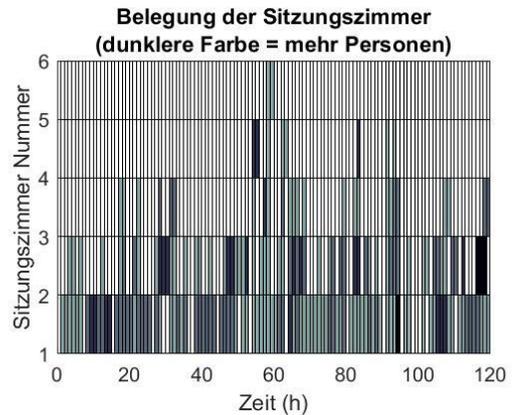


Abbildung 9: Sitzungen meist 2 (hellgrün), oft auch mit 3 bis 5 Personen (dunkelgrün)

Die Abbildung 6 bis Abbildung 9 können einfach und schnell interpretiert werden: Meistens sind 22 bis 32 Personen im Büro anwesend, das Büro ist nie vollbesetzt. Während knapp 15 % der Arbeitszeit besteht der Bedarf nach 4 bis 6 Sitzungszimmern. Im Durchschnitt besetzen etwa 5 Personen einen Arbeitsplatz obwohl sie sich in Sitzungen aufhalten. Es besteht ein regelmässiger Bedarf an Sitzungsräumlichkeiten für 3 bis 5 Personen (manchmal auch mehr).

Mit solchen Methoden kann ein Bürobereich optimal geplant werden. Dadurch sinken sowohl die Kosten wie auch der Energiebedarf auf das Minimum. Trotzdem kann die Nutzung noch ohne Einschränkungen gewährleistet werden.

Für eine Simulation des Energiebedarfs sind Nutzungsprofile wie in Abbildung 6 erforderlich. Die Nutzung hat direkten Einfluss auf die internen Wärmegewinne und damit auf den Heiz- und Kühlbedarf. Zudem sind der Lüftungsbedarf und der Strombedarf für die Beleuchtung ebenfalls von der Nutzungsintensität abhängig.

8.2. Wärme- und Kältebedarf

8.2.1. 3D-Modell

In einer Projektarbeit wurde mit der Software DesignBuilder gearbeitet. Der DesignBuilder errechnet die Energieflüsse in einem Gebäude dynamisch für ein Jahr aufgrund eines digitalen 3D-Modells des Gebäudes.

Das 3D-Modell wird materialisiert, wodurch physikalische Eigenschaften wie thermische Masse oder U-Werte des Gebäudes bestimmt werden. Weiter muss das Gebäude auf dem Globus platziert werden, um Tageslängen, Sonnenstand und das Wetter zu definieren. Damit kann die Sonneneinstrahlung, aber auch die Beschattung des Gebäudes errechnet werden. So zeigt Abbildung 10 dass die flankierenden Gebäude im Südosten und Nordwesten Teile des Gebäudes RA am Morgen und am Abendverschatten.

Um das Modell einfach zu halten, wurde die Fensterfläche in Prozent der Fassadenfläche definiert. Das Programm verteilt die Fenster dann automatisch, was nicht ganz der Realität entspricht.

Da das Gebäude RA ein massiver Betonbau ist, ist es wichtig im Modell auch die Zwischenböden und Innenwände zu berücksichtigen. Diese wurden ebenfalls konstruiert und materialisiert. Nur so kann der Speichereffekt der thermischen Masse in der Simulation berücksichtigt werden (Abbildung 11). Die grosse thermische Masse in Kombination mit einer thermisch optimierten Aussenhülle führt einerseits zu einem sehr trägen thermischen System, resultiert andererseits aber auch in sehr geringen Anforderungen an die Heizung und Kühlung. Insbesondere können damit die Leistungsspitzen der Heiz- und Kühlsysteme gebrochen werden, da sich ändernde Witterungsverhältnisse durch die Fassade stark gedämpft und verzögert bemerkbar machen und die thermische Masse die Raumtemperatur weiter stabilisiert.

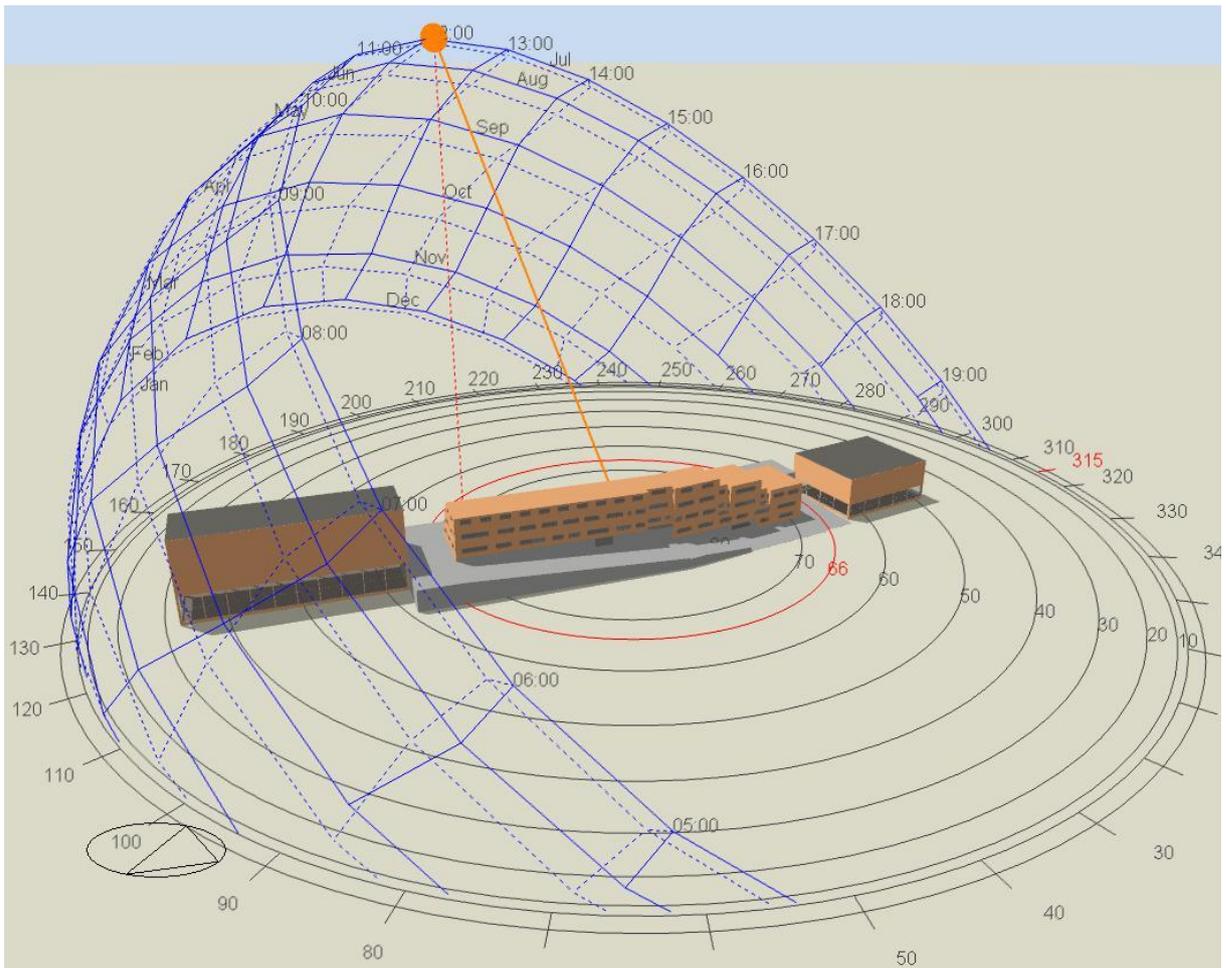


Abbildung 10: Aussendarstellung des 3D Modells des RA an einem Sommertag um 12.00 Uhr

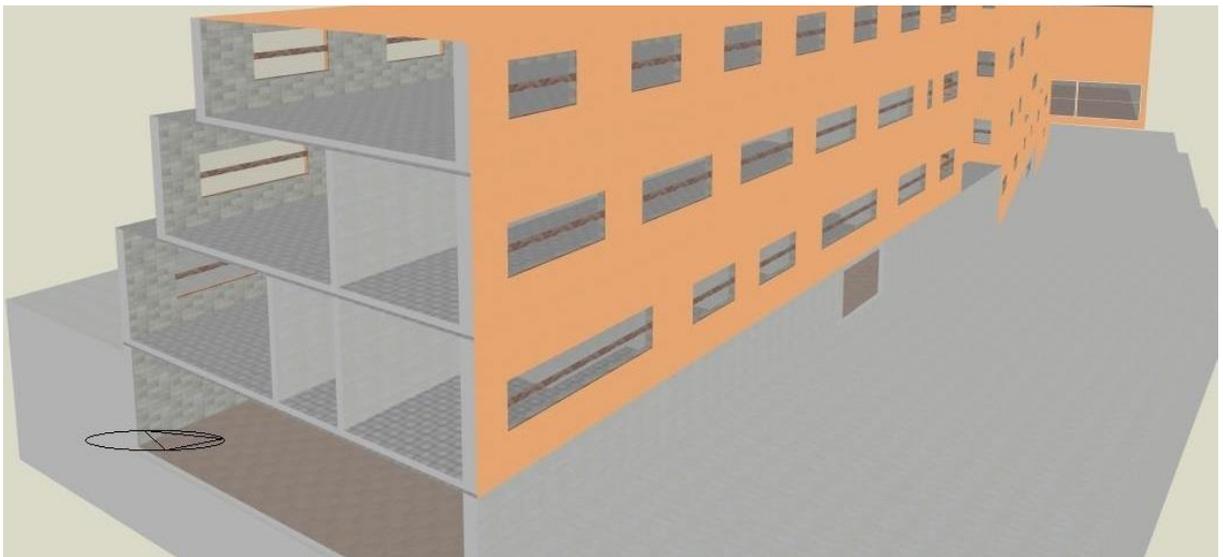


Abbildung 11: 3-D-Modell Gebäude RA mit massiven Bauteilen

8.2.2. Simulation Wärme- und Kältebedarf

Basierend auf dem 3D-Modell wurde der Betrieb des RA über ein Jahr simuliert und unter anderem der Heiz- und Kühlbedarf ermittelt.

Dazu muss die Nutzung des Gebäudes berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 8.1). Damit wird definiert, wann sich wo wie viele Personen im Gebäude aufhalten. Weiter muss angegeben werden, welche energetischen Lasten von Prozessen im Gebäude vorhanden sind. Anhand der Elektrozähler werden die elektrischen Lasten im Gebäude auf etwa 100 000 kWh pro Jahrgeschätzt. Mit diesem Wert wurde die Simulation sozusagen geeicht, d.h. die internen Lasten wurden so angepasst, dass über das Jahr für Beleuchtung und Bürogeräte wiederum 100 000 kWh anfallen.

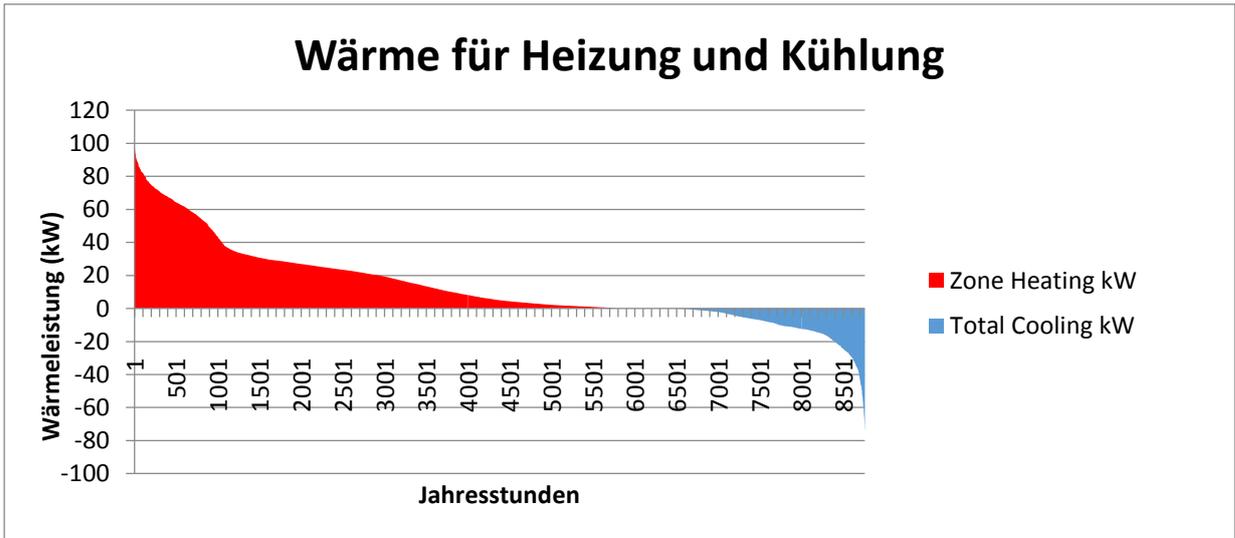


Abbildung 12: Jahresdauerlinie der thermischen Leistung für die Wärme (rot) und die Kühlung (blau)

In der Abbildung 12 sind die Jahresdauerlinien für den simulierten Wärme- und Kältebedarf dargestellt. Der totale Heizwärmebedarf beträgt jährlich 139 000 kWh oder 29,5 kWh/m², was ziemlich genau den 29,4 kWh/m² im Minergieantrag entspricht. Der totale Kältebedarf wird mit 25 500 kWh berechnet. Die Berechnungen der Planer nach SIA Merkblatt 2044 für den Minergieantrag führen zu einem Kältebedarf von 45 000 kWh. Während der berechnete Heizwärmebedarf im Minergieantrag und der Simulation sehr gut übereinstimmen, ist der Wert für die Kälte nach SIA Merkblatt 2044 fast um den Faktor 1,8 grösser als in der Simulation.

Damit benötigt das Gebäude gemäss Simulation gut 5,5 mal soviel Wärme wie Kälte. Über ein ganzes Jahr können somit nur rund 24 % der dem Untergrund entzogenen Wärme über die Regeneration wieder dem Untergrund zugeführt werden, wenn mit einem mittleren COP der Wärmepumpe von 4 gerechnet wird.

Im Minergieantrag sind 16 340 kWh Strombedarf für die Wärmepumpe erwähnt, was einer Jahres-Arbeitszahl von 2,8 entspricht. Für die Wärmepumpe wurde in der Simulation ein konstanter COP von 4 gewählt und beim FreeCooling wurde ein COP von 20 eingesetzt. Die Auswertung der Betriebsdaten (Kapitel 13) zeigt, dass die Werte der Simulation etwas zu pessimistisch angenommen wurden.

Aus diesen Simulationsrechnungen kann auch auf den Wärme- und Kälteleistungsbedarf geschlossen werden. Die maximal erforderliche Heizleistung liegt knapp unter 100 kW oder bei ca. 21 W/m². Dies kann mit den Angaben im Minergieantrag von 114 kW und der installierten Leistung von 180 kW verglichen werden. Die berechneten 21 W/m² liegen ziemlich genau bei den für Minergie-Gebäude anzunehmenden 20 W/m² und deshalb in einem vernünftigen und realistischen Bereich.

Der Kälteleistungsbedarf am heissesten Tag liegt etwa bei 74 kW. Dieser fällt nur im Hochschulbereich an und beträgt dort im Mittel 19 W/m².

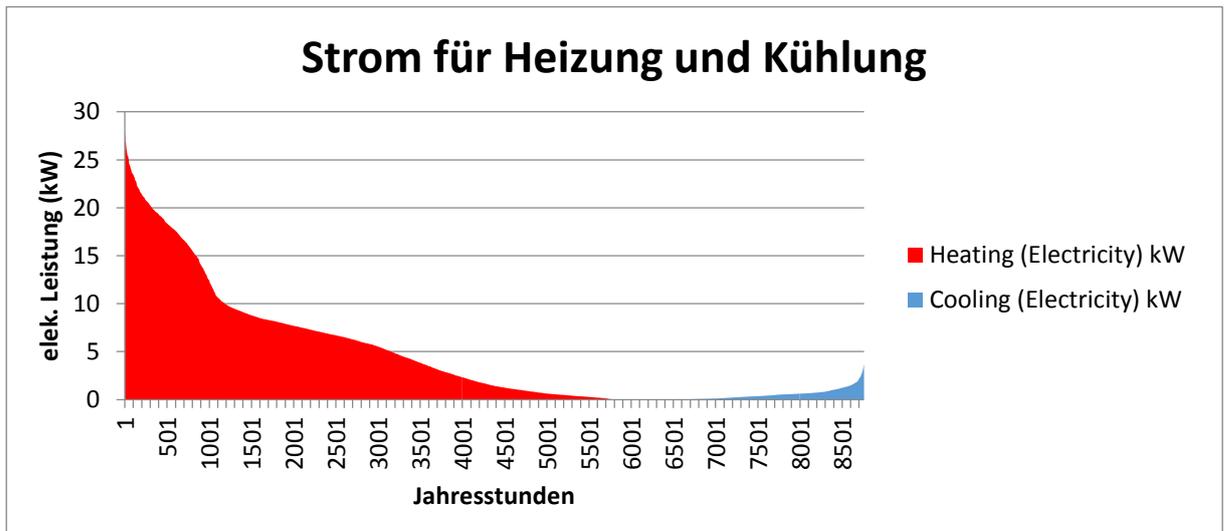


Abbildung 13: Jahresdauerlinie der elektrischen Leistung für Wärmepumpe (rot) und freie Kühlung (blau)

Mit den angenommenen Werten für den COP der Wärmepumpe von 4 und für das Free-Cooling von 20 kann auch der Strombedarf für die Wärmeerzeugung und für die Kühlung des Hochschulbereichs berechnet werden (Abbildung 13). In der Tabelle 2 sind die Ist-Werte vor der Optimierung und die Simulationswerte für den Vergleich mit der Minergie-Eingabe auf m² umgerechnet eingetragen.

	Minergie-Eingabe	Ist-Werte vor Optimierung	Simulation ZHAW
Spez. Heizwärme Q_h pro Jahr	29,4 kWh/m ²	73,1 kWh/m ²	29,5 kWh/m ²
Nennleistung Wärmeerzeugung	114 kW	180 kW	98 kW
gerechnet mit EBF = 4720 m ²			
Elektr. Energie Wärmepumpe	7,2 kWh/m ²	17 kWh/m ²	7,4 kWh/m ²
Elektr. Leistung Wärmepumpe	28 kW	41,9 kW	25 kW
JAZ (Wärmepumpe)	4,1	4,3	4,0
gerechnet mit EBF = 4720 m ²			
Elektr. Energie Freie Kühlung	4,1 kWh/m ²	1,27 kWh/m ²	0,32 kWh/m ²
Elektr. Leistung Freie Kühlung	- kW	4,1 kW	-- kW
gerechnet mit EBF = 3954 m ²			
Strombedarf Gebäude Total	11,3 kWh/m²	18,3 kWh/m²	7,72 kWh/m²

Tabelle 2: Vergleich Energiebedarf Minergieantrag, Ist-Werte vor Optimierung und Simulation.

8.3. Beleuchtung

Beleuchtung des Bürobereichs

Mit dem Programm DIALux wurde eine 3D-Darstellung der Bürozone erstellt. Mit DIALux können Beleuchtungsszenen fotorealistisch dargestellt und mit verschiedenen Werkzeugen ausgewertet werden. Die Abbildung 17 zeigt die Ausstattung eines Ausschnitts des Büros bei Tageslicht. In Abbildung 14 ist derselbe Ausschnitt in einer Falschfarbendarstellung abgebildet und zeigt die Beleuchtungsstärken bei Tageslicht. Insbesondere können die Beleuchtungsverhältnisse auf den Arbeitsflächen gezeigt und interpretiert werden.

Die Abbildung 15 zeigt dieselbe Szene bei Nacht mit eingeschalteter Arbeitsbeleuchtung. Auch hier wird die Ausleuchtung der Arbeitsflächen übersichtlich dargestellt. Für Bildschirmarbeitsplätze wird eine Beleuchtungsstärke von 500 Lux empfohlen. Mit der Legende in Abbildung 16 wird das Bild in Abbildung 15 einfach interpretierbar. Für einen Grossteil der Arbeitsflächen sind diese Anforderungen gut erfüllt und es ist sogar etwas zu hell. Gegen die Aussenwände und Fenster hin ist die Ausleuchtung hingegen etwas schwächer.

In den Arbeits- wie auch Unterrichtsräumen sind abgehängte Rasterleuchten mit T15-FL-Röhren mit geringem Indirekt-Anteil eingesetzt. Diese sind eine effiziente und gute Lösung. In den Arbeitsbereichen wie auch in den Unterrichtsräumen wird die Beleuchtung über Präsenzmelder ausgeschaltet, wenn ca. 15 Minuten niemand mehr anwesend ist. Diese Art der Steuerung ermöglicht eine gute Energieeffizienz, da die Nutzer die Beleuchtung oft erst bei weniger als 500 Lux einschalten, und infolge der Beeinflussbarkeit trotzdem zufrieden sind.

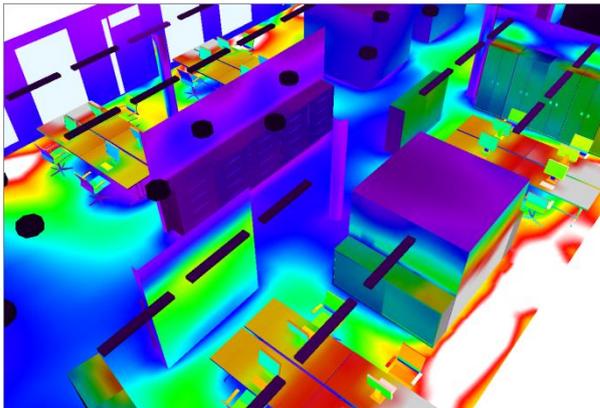


Abbildung 14: Falschfarbendarstellung der Simulation des Tageslichts

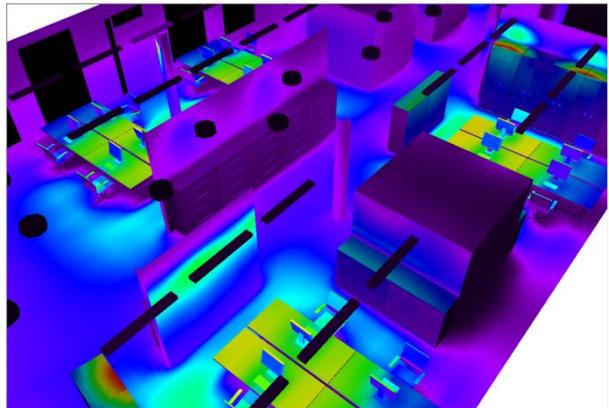


Abbildung 15: Falschfarbendarstellung der Simulation der Arbeitsbeleuchtung

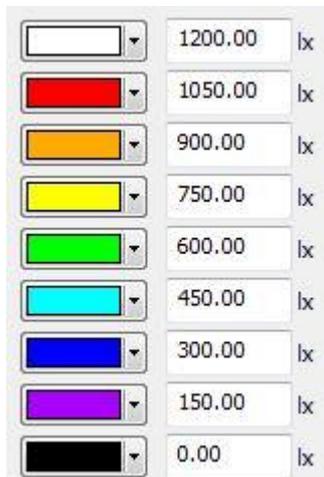


Abbildung 16: Legende der Falschfarben

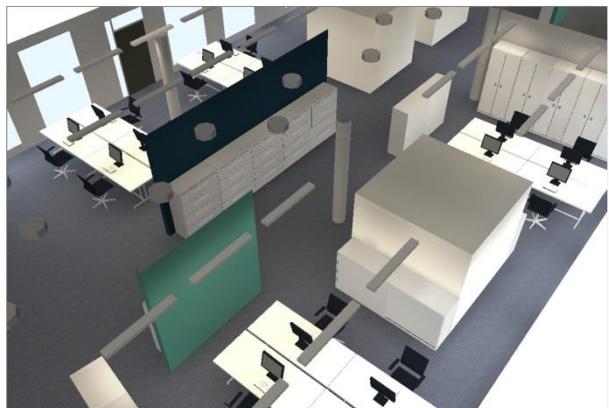


Abbildung 17: Ausschnitt des Institutsbüros simuliert bei Tageslicht

Beleuchtung der Verkehrszonen

Die Beleuchtung der Verkehrsflächen ist im gesamten Gebäude mit angebauten, runden Leuchten mit mattweisser Abdeckung und je zwei Sparlampen gelöst. Sie wird über Präsenzmelder ein- und ausgeschaltet. Insgesamt funktioniert diese Lösung gut. Allerdings brennen die Lichter zu oft. In der Bürozone bleibt die Beleuchtung im Mittelgang das ganze Jahr über den ganzen Tag eingeschaltet. Die automatische Abschaltung erfolgt erst nach zu langer Verzögerungszeit von etwa 30 Minuten. Obschon das Gebäude 2013 in Betrieb ging, wurden in den Verkehrsflächen noch keine LEDs eingesetzt, sondern herkömmliche Sparlampen. Bei der Beleuchtung besteht hier also noch Verbesserungspotential bei der Effizienz und der Brenndauer. Mit LED-Lampen würde auch der Unterhalt vereinfacht, da diese länger halten als Sparlampen.

9. Massnahmen zur Techniko Optimierung

Aufgrund der Ist-Analyse der installierten Gebäudetechnik und der Auswertung der ersten Ablesungen wurde klar, dass es als Basis für eine energetische Betriebsoptimierung zuerst zwei Anpassungen der technischen Installationen braucht.

Zum einen muss die vorhandene Anlagen-Automation mit einem Gebäudeleitsystem ergänzt werden. Zum anderen muss sichergestellt werden, dass die Wärmezähler korrekt messen, was Anpassungen der Hydraulik erfordert.

9.1. Ergänzung Anlagenautomation

Es stellte sich sehr schnell heraus, dass es mit der vorhandenen Anlagensteuerung nicht möglich war, die Anlage im Betrieb zu überwachen. Man konnte die Messwerte des Systems nur an einem kleinen Bildschirm im Heizungsraum anschauen und nicht exportieren. Weder können Daten gespeichert, dargestellt oder verglichen werden, noch ist es möglich die gespeicherten Daten zu exportieren. Wegen der zum Teil offensichtlichen Betriebsprobleme und der Überzeugung, diese auch lösen zu können, ermöglichte der Gebäudeeigentümer die Anschaffung eines Gebäudeleitsystems. Mit diesem ist es nun möglich, den Anlagebetrieb genügend detailliert zu analysieren.

Am 25.9.2015 wurde das Gebäudeleitsystem vom Typ Neutrino-GLT installiert. Die Neutrino-GLT Software basiert auf dem 32-Bit Betriebssystem QNX mit Echtzeit- und Netzwerkfähigkeit und grafischer Oberfläche. Es ermöglicht den Fernzugriff über ein Netzwerk, sowie das Aufzeichnen von bis zu 200 verschiedenen Messwerten. Mit der grafischen Oberfläche ist es möglich, die Betriebszustände rasch und von jedem autorisierten PC aus anzusehen. Damit kann eine energetische Betriebsoptimierung wesentlich besser und einfacher erfolgen.

Zudem ist es mit einem solchen System möglich, Messdaten des gesamten Systems auszulesen, zu speichern und schlussendlich zu analysieren. Momentan werden über 100 verschiedene Messwerte aufgezeichnet. Dabei handelt es sich um Temperaturen, Ein/Aus-Schaltvorgänge sowie um Volumenströme. Die Software erlaubt das Exportieren von Daten mit einer maximalen zeitlichen Auflösung von 1 Minute.

Die verschiedenen Messwerte werden dabei über das BACnet Protokoll vom Messgerät zum Gebäudeleitsystem übertragen. Um zu viel Traffic im Netzwerk zu verhindern, wurde die Übertragung so eingerichtet, dass ein Wert erst dann übertragen wird, wenn er sich um mindestens 0,5 °C verändert hat. Es bedeutet aber auch, dass sich die Auflösung der Messungen verringert. Bei dem trägen thermischen System, mit denen wir es hier zu tun haben, macht das aber keinen allzu grossen Unterschied.

Diese Wärmezähler konnten zunächst jedoch nur manuell abgelesen werden, nun sind auch sie mit dem Gebäudeleitsystem verbunden. Zur Kommunikation benutzen die Wärmezähler das M-Bus Protokoll. Um trotzdem mit dem Gebäudeleitsystem verbunden werden zu können wurde noch ein Gateway zum BACnet installiert (NeoNet Display SX 632). So können nun auch die Werte der Wärmezähler regelmässig aufgezeichnet werden.

Die Abbildung 18 zeigt ein Beispiel der grafischen Oberfläche im neuen Gebäudeleitsystem. Abbildung 19 zeigt ein Beispiel der Darstellung von Daten im neuen Gebäudeleitsystem.

Energetische Betriebsoptimierung Minergiegebäude Seifen-Sträuli der ZHAW in Wädenswil

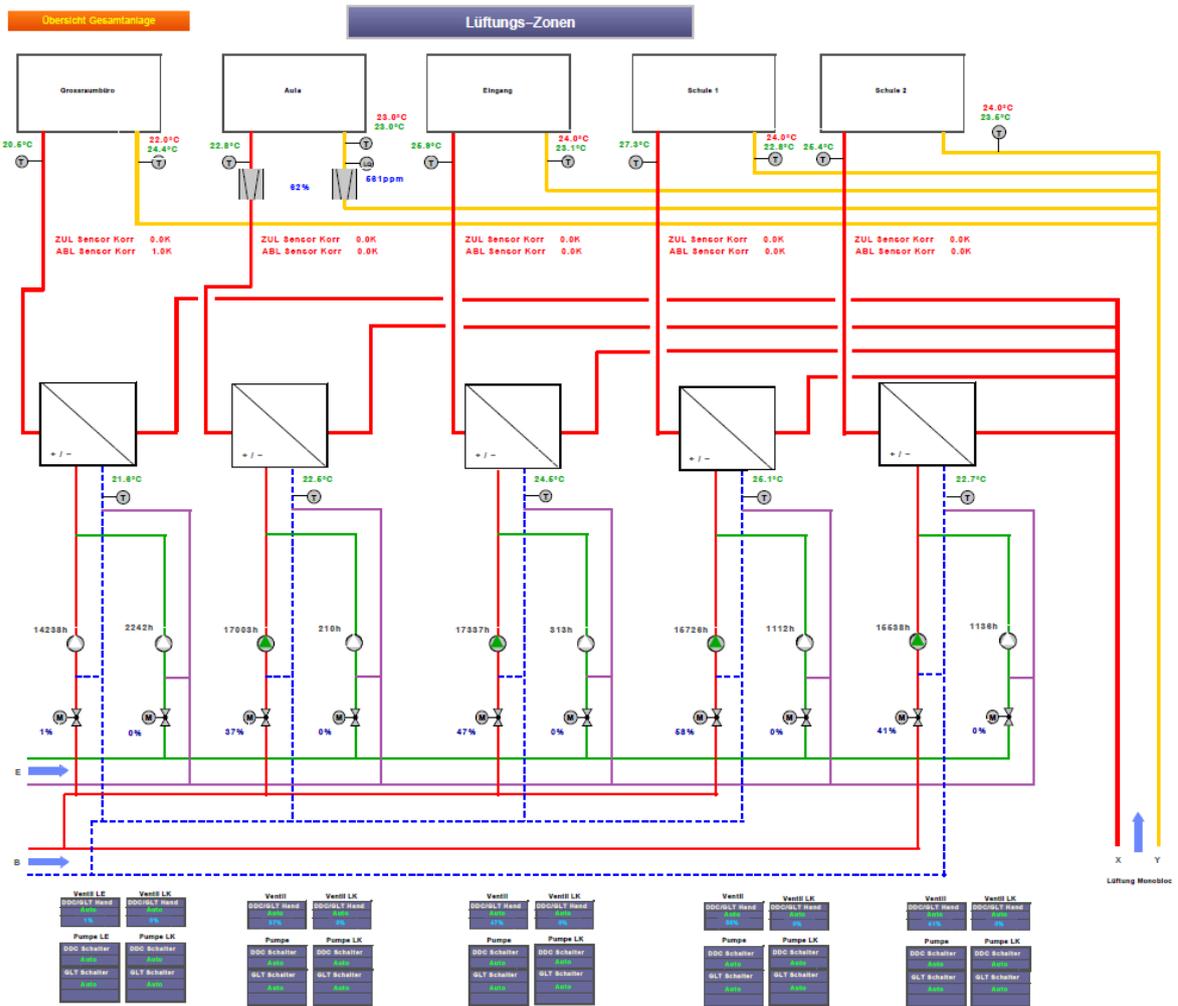


Abbildung 18: Darstellung Lüftungszonen im Gebäudeleitsystem



Abbildung 19: Darstellung Temperaturmessungen im Gebäudeleitsystem

9.2. Wärmehähler-Probleme

Im Heizungsraum sind drei Wärmehähler vom Typ NeoVac Supercal 531 installiert. Sie messen den Wärmeverbrauch für die Nacherhitzer der Lüftung, den Wärmeverbrauch der TABS sowie den Wärmeverbrauch der Fussbodenheizung der Wohnungen. Die Wärmehähler messen die Vor- und Rücklauftemperatur sowie den Volumenstrom des Kreislaufs. Daraus wird die momentane Leistung und schlussendlich der Energieverbrauch berechnet.

Beim Analysieren der ausgelesenen Werte für den Energieverbrauch zeigte sich jedoch schnell, dass die Werte nicht stimmen können. Die gezählte Energie nahm gleichmässig zu, auch am Wochenende und in der Nacht, obwohl die Lüftung abgestellt ist. Die wahrscheinlichste Erklärung war, dass statt der Energiemenge, die vergangenen Minuten aus dem Gerät gelesen wurden. Am 3.12.2015 wurden die Wärmehähler neu aufgeschaltet. Die Daten werden nun richtig aus dem Gerät ausgelesen. Die Werte auf dem Gerät selber und im Gebäudeleitsystem stimmen nun überein.

Allerdings zeigten sich weitere Unstimmigkeiten in den gemessenen Werten. So wurde festgestellt, dass die gemessene Leistung der Lüftung nicht Null ist auch wenn sie ausgeschaltet ist. Die Wärmeleistung der Lüftung fiel nicht unter 4 kW. Ähnlich die TABS, deren Leistung pendelte auch bei abgeschaltetem Strang um 10 kW. Trotz geschlossenen Ventilen und abgeschalteten Pumpen konnte ein Volumenstrom bei den Wärmehählern für die Lüftung und die TABS festgestellt werden. Eine genauere Analyse der Aufzeichnungen des Gebäudeleitsystems zeigte für die Lüftung und die TABS Wärmeleistungskurven mit sehr ähnlicher Form, was eine Abhängigkeit der Volumenströme nahelegte. Erst das Zeichnen eines synoptischen Anlagenschemas ermöglichte das Erkennen einer Fehlströmung im System. Gelbe Pfeile (sind die Pfeile in die richtige Richtung?) zeigen die Fehlströmung bei TABS aus, Lüftungs-Heizregister ein (Abbildung 20). Eine Verbindung zwischen dem TABS Kreislauf und dem Lüftungskreislauf über den Leitungsstrang zum Wärmetauscher für den Kühlfall ermöglichte unkontrollierte Strömungen über die Wärmehähler auch wenn die entsprechenden Verbraucher ausgeschaltet waren. Dieses Problem konnte mit dem Einbau von zwei Rückschlägern im Kühlkreis am 27.04.2016 behoben werden. Die Daten der Wärmehähler sind also erst seit diesem Zeitpunkt aussagekräftig.

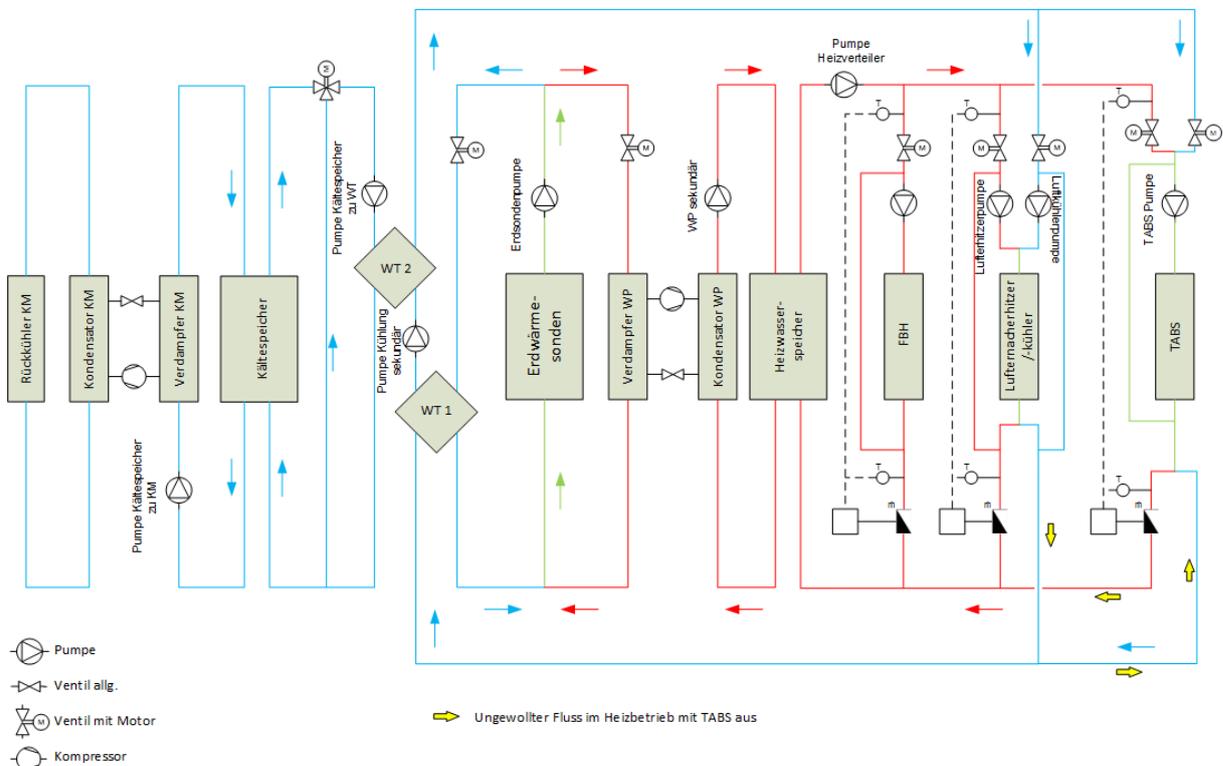


Abbildung 20: Synoptisches Schema der Anlage mit (gelb) Fehlströmung

10. Optimierung Lüftungsbetrieb

Zu Beginn des Optimierungs-Projekts benötigte die HLK-Anlage im Durchschnitt 300 kWh elektrische Energie pro Tag mit der vorgefundenen Konfiguration der Steuerung. Nicht eingerechnet ist hier die elektrische Antriebsenergie der Wärmepumpen. Mit den im Folgenden erklärten drei Massnahmen konnte dieser Bedarf auf etwa 85 kWh pro Tag reduziert werden. Bei einem Strompreis von 14 Rp./kWh entspricht dies jährlichen Einsparungen von über 10 000 CHF bei Gesamtkosten des Optimierungs-Projekts von 50 000 CHF. Davon entfallen fast 20 000 CHF auf die nachträgliche Installation des Gebäudeleitsystems, die restlichen 30 000 CHF sind Honorarkosten. In Abbildung 21 ist der tägliche Energieverbrauch der HLK Anlage dargestellt. Darin sind die Auswirkungen der drei Optimierungs-Massnahmen, welche in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert werden, gut erkennbar. Zusätzlich werden weitere Massnahmen geschildert, welche während des Optimierungsprozesses getätigt wurden.

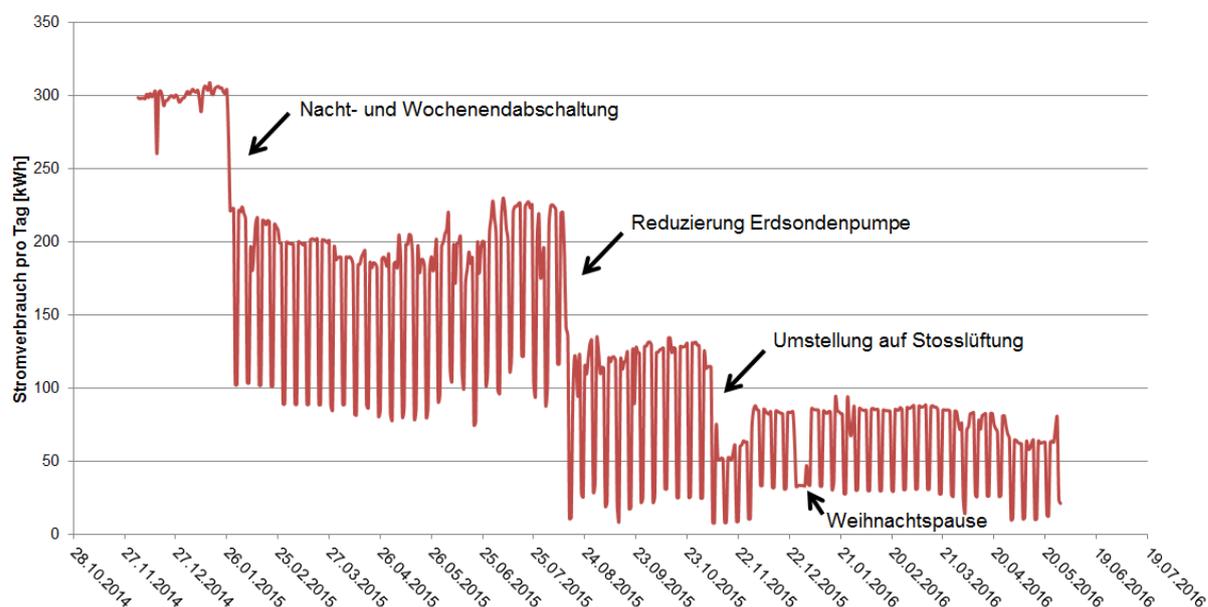


Abbildung 21: Verlauf Tages-Energieverbrauch der HLK Anlage

10.1. Nacht und Wochenendabschaltung

Am 27.01.15 wurde die erste Massnahme im Rahmen des Projekts umgesetzt. Seit der Eröffnung des Gebäudes war die Lüftung ununterbrochen eingeschaltet. Es gab weder eine Nacht- noch ein Wochenendabschaltung, obwohl sich zu beiden Zeiten niemand im Gebäude befindet. Diese Einstellung wurde vom Planer so im rudimentären Funktionsbeschreibung der Anlage gefordert.

Die Betriebszeit der Lüftung im Hochschulfbereich wurde neu so eingestellt, dass sie nur noch an Werktagen von 7 Uhr bis um 19 Uhr läuft. Zu allen anderen Zeiten ist sie komplett ausgeschaltet. Das entspricht einer Einsparung der Betriebszeit und damit an elektrischer Energie für die Ventilatoren von fast 65 %. Die Einsparung an Heizenergie ist wohl sogar noch grösser, da die zugeführte Aussenluft in der Nacht stärker aufgewärmt werden muss als am Tag. Im Sommer kann umgekehrt etwas Energie für die Zuluftkühlung eingespart werden, insbesondere an den Wochenenden.

Ausserdem wurde durch diese Massnahme auch das Problem zu der tiefen Luftfeuchtigkeit im Gebäude etwas entschärft, da im Winter weniger trockene Zuluft das Gebäude austrocknet.

10.2. Umstellung auf Stosslüftung

Auch nach der Abschaltung der Lüftung in den Nichtnutzungszeiten des Hochschulbereichs war im Winter die Luft in den Räumen nach wie vor deutlich zu trocken. Gleichzeitig war aufgrund der Nutzung des Gebäudes klar, dass die Lüftung, die nur 0 oder 100 % betrieben werden kann, in den meisten Zeiten wesentlich überdimensioniert läuft. Um das Problem mit der trockenen Innenluft zu entschärfen, wurde die Lüftung während der Nutzungszeit auf intermittierenden Betrieb (Stosslüftung) umgestellt (Tabelle 3). Die durch diese Massnahme erzielten Einsparungen sind in Tabelle 4 ersichtlich. Die durchschnittlichen Tages-Aussentemperaturen während der hier betrachteten Zeitperiode (9. November bis zum 19. November 2015) und der Periode vom 26. Oktober bis 9. November 2015 liegen sehr nahe beieinander (je bei ca. 11,5 °C). Daher lassen sich auch die Wärmeverbräuche vergleichen. Die Einsparungen an Wärmeenergie fallen nun deutlich tiefer aus als die Einsparungen an elektrischer Energie. Das kommt daher, dass die meiste Wärme am frühen Morgen aufgewendet werden muss, wenn die Aussenluft noch kühl ist und dementsprechend aufgewärmt werden muss. Zu dieser Zeit läuft die Lüftung auch mit dem neuen Zeitplan. Der Aufwand an elektrischer Energie ist unabhängig von der Tageszeit und ist im Wesentlichen nur von der Einschaltdauer abhängig. Nachts und am Wochenende läuft die Lüftung weiterhin nicht.

Lüftungsprogramm						
Laufzeit	7.30-9.30		11.30-13.00		14.30-16.00	
Pausenzeit		9.30-11.30		13.00-14.30		16.00-7.30
Dauer (h)	2	2	1,5	1,5	1,5	15,5

Tabelle 3: Lauf- und Pausenzeit der Lüftung

	Durchschn. Verbrauch an Strom pro Tag (kWh)	Durchschn. Verbrauch an Wärme pro Tag (kWh)
Konstanter Betrieb 07.00 – 19.00, Mo - Fr	70,3	54,4
Stosslüftung neu	36,3	41,4
Reduktion absolut	34	13
Reduktion (%)	48	24

Tabelle 4: Einsparungen Lüftungssystem mit Stosslüftung gemäss Tabelle 3

Anschliessend wurde überprüft, ob mit dieser Stosslüftung die Innenluftqualität noch gewährleistet werden kann. Ebenso wurde die nun resultierende Luftfeuchte gemessen.

In den Diagrammen in Abbildung 22 und Abbildung 23 sind die Verläufe der CO₂-Konzentration bzw. der relativen Luftfeuchtigkeit im Bürobereich jeweils über eine Woche dargestellt. Die blaue Kurve zeigt dabei den Verlauf einer Woche (2.11.15 - 8.11.15) mit dem alten Lüftungszeitplan, die rote Kurve den Verlauf einer Woche (9.11.15 - 15.11.15) mit der Stosslüftung. Unterhalb der zwei CO₂-Kurven sind die Ein-/Ausschaltzyklen der Lüftung dargestellt. Auffallend sind die erhöhten CO₂-Konzentrationen vor allem nach einer längeren Ausschaltperiode der Lüftung. Dadurch ergeben sich CO₂-Konzentrationen von bis zu 1100 ppm, verglichen mit einem Maximum von ca. 750 ppm vorher. Die erhöhten Konzentrationen liegen aber immer noch im Bereich guter resp. im oberen Bereich von mittlerer Luftqualität. Bei der Feuchtigkeit zeigt sich der erhoffte Effekt. Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit stieg in den beiden gemessenen Wochen von 45,1 % auf 49,0 %. Während beim kontinuierlichen Betrieb der Lüftung die Luftfeuchtigkeit während des Tages stetig abnahm, so zeigt sich nun eine leichte Auf- und Ab-Bewegung. Während den Ausschaltphasen der Lüftung steigt die Luftfeuchtigkeit durch das Ausatmen der Gebäudenutzer an.

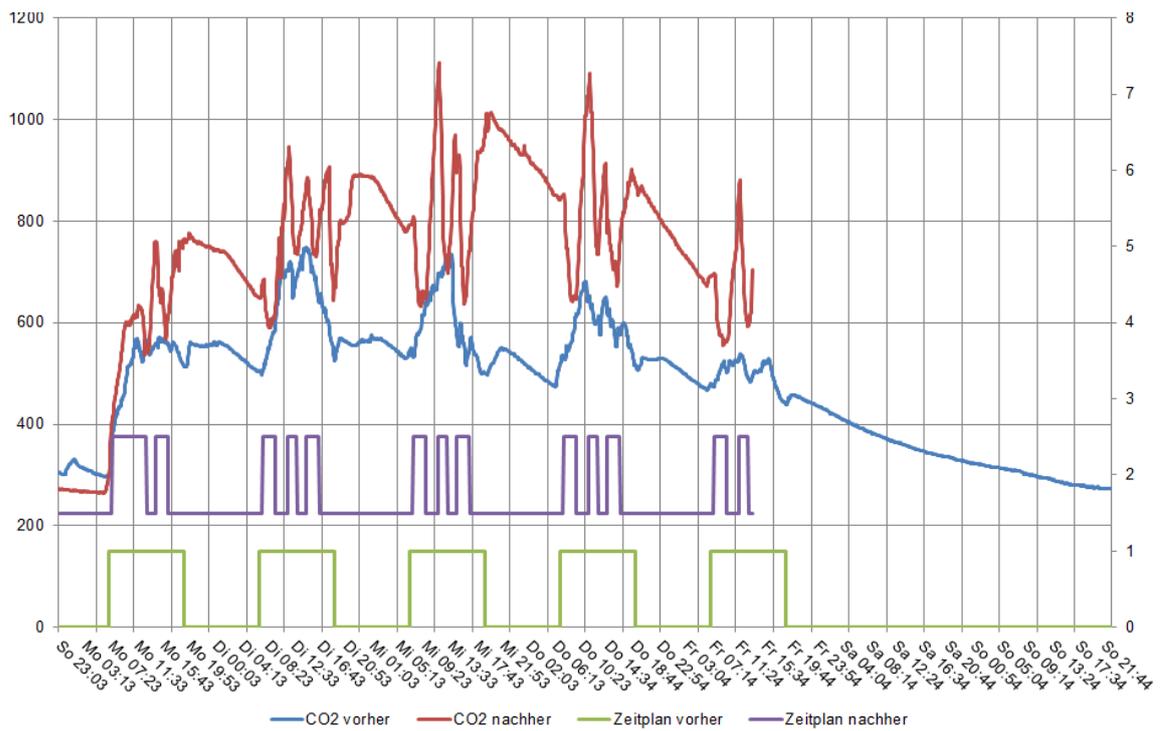


Abbildung 22: Verlauf der CO₂ Konzentration im Bürobereich vor und nach Einführung Stosslüftung

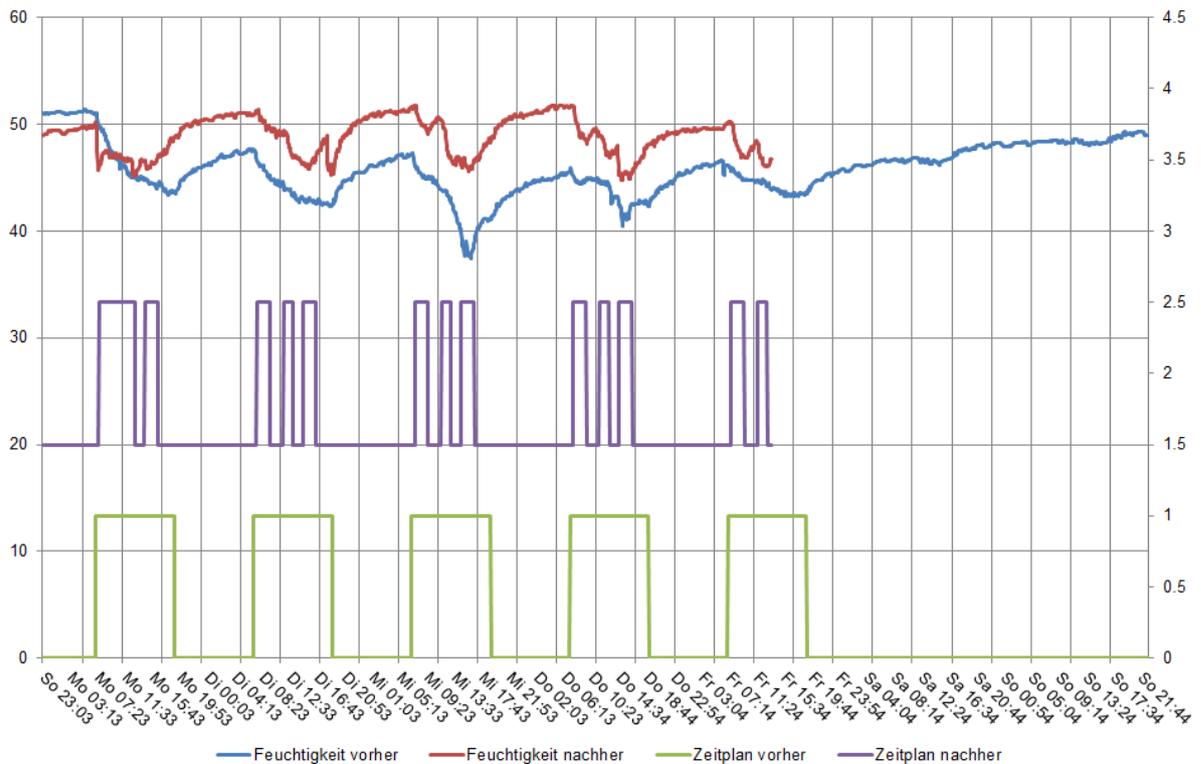


Abbildung 23: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit im Bürobereich vor und nach Einführung Stosslüftung

Ab dem 27.01.2016 wurden die Intervalle noch etwas nachgebessert. Die Pausen wurden besser auf den Tagesablauf des Gebäudes abgestimmt und verkürzt. Insgesamt läuft die Lüftung nun 6,25 Stunden am Tag. Damit konnten insbesondere Geruchsbelastungen über Mittag reduziert werden.

10.3. Optimierung der Zuluft Erwärmung

Die Analyse des Energieverbrauchs der Lüftung ergab, dass sogar im Hochsommer Wärmeenergie verbraucht wurde. Der Grund dafür war, dass die Regulierung der Nachwärmer darauf eingestellt war, immer eine bestimmte Mindest-Zulufttemperatur zu erreichen. Diese betrug 18 °C. Am Morgen, wenn die Aussentemperatur tiefer war als der Sollwert, wurde deshalb oft nachgeheizt. Dies insbesondere auch weil die Wärmerückgewinnung nicht optimal eingestellt war und die Zuluft auf lediglich 16 °C erwärmte (siehe Kap.10.4). An einem heissen Sommertag, an welchem das Gebäude den Rest des Tages gekühlt werden muss, macht es allerdings keinen Sinn, morgens noch zusätzliche Wärme ins Gebäude zu bringen, die dann kurz danach wieder abtransportiert werden muss.

Als Massnahme wurde ein Totband zwischen 15 °C und 23 °C Aussentemperatur eingerichtet. In diesem Band sind das Heiz- und das Kühlsystem für die Lüftungsanlagen ausgeschaltet. Die Zonnennachwärmer werden erst ab einer Aussentemperatur von unter 15 °C eingeschaltet, gekühlt wird erst ab einer Aussentemperatur von über 23 °C. Das ergab allerdings ein weiteres Problem, welches nachfolgend erläutert wird.

10.4. Optimierung der Wärmerückgewinnung

Das System besitzt einen Rotations-Enthalpietauscher mit einer Nenneffizienz für sensible Wärme von 0,77 (gemäss Minergieantrag). Das System wird mit einer Zuluftsolltemperatur nach der WRG geregelt, d.h. die Geschwindigkeit des Wärmerückgewinnungsrades wird so gesteuert, dass eine bestimmte Zulufttemperatur nach der WRG erreicht wird. Diese Zuluftsolltemperatur war auf 16 °C eingestellt.

Durch die Einführung des Totbandes zwischen 15 °C und 23 °C zeigte sich ein Problem mit diesem Sollwert. An Tagen mit Aussentemperatur knapp über 15 °C ist die Nachwärmung noch ausgeschaltet, die Lüftung ist jedoch tagsüber in Betrieb. Die Aussenluft wurde dann zwar durch die Wärmerückgewinnungsanlage auf den Sollwert von 16 °C erwärmt, danach aber unverändert mit 16 °C ins Gebäude geführt. Das hätte zu temporär zu kühlen Raumtemperaturen und zu Komfortproblemen führen können. Gleichzeitig wurde so die Wärmerückgewinnungsanlage insbesondere in der Übergangszeit nicht optimal ausgenutzt. Sie hätte die Aussenluft auch auf höhere Zulufttemperaturen erwärmen können, wurde allerdings von der Steuerung gebremst, da ja der eingestellte Sollwert schon erreicht wurde.

Diese nicht optimale Ausnutzung der Wärmerückgewinnung bedeutet eine grosse Energieverschwendung. Bei 30 000 m³/h Luftvolumenstrom entspricht jedes Grad Temperaturdifferenz zwischen Aussenluft und Zuluft einer thermischen Leistung von 9,7 kW.

Deshalb wurde der Sollwert nach WRG auf 23 °C erhöht, mit der Absicht die Wärmerückgewinnung auszureizen. Es zeigte sich schnell, dass durch den zu tiefen Sollwert oft bis zu 5 °C Temperaturdifferenz verschenkt wurden, also bis zu fast 50 kW Wärmeleistung, die nutzlos mit der Abluft nach draussen abgegeben wurde. Die Rückwärmezahl des Wärmetauschers wurde durch die optimalere Ausnutzung um mehr als 20 % gesteigert.

Ein Gespräch mit dem Regelungstechniker ergab, dass es sich um einen Denkfehler seinerseits handelte. Er hatte Bedenken, dass die Zuluft im Sommer zu stark erwärmt werden würde und dann wieder heruntergekühlt werden müsse. Dieser Einwand basiert jedoch auf einem Denkfehler, da die Wärmerückgewinnung auch als Kühlung wirken kann, falls die Aussenluft wärmer ist als die Abluft des Gebäudes.

In seltenen Fällen (im Sommer) kann es vorkommen, dass die Zuluft zu den Räumen doch tiefer sein soll als die Zuluft nach der Wärmerückgewinnung. In diesem Fall muss dann noch mittels FreeCooling über die Erdwärmesonden nachgekühlt werden. Verglichen mit der Wärmeproduktion via Wärmepumpe ist dieses FreeCooling jedoch sehr energiesparend.

Es soll für weitere Optimierungen noch geklärt werden, wie aufwändig es mittels der Softwareware, die Wärmerückgewinnung nicht nur anhand einer fixen Solltemperatur zu steuern.

Ein Beispiel dazu:

An einem Sommermorgen ist das Gebäude immer noch aufgeheizt vom Vortag und hat eine Raumtemperatur von 25 °C bei einer Solltemperatur von 23 °C. Die Aussenlufttemperatur beträgt 18 °C. Die Wärmerückgewinnungsanlage bringt die Aussenluft nun auf eine Temperatur von 23 °C. Das Lüftungssystem möchte aber kühle Zuluft mit 18 °C in die Räume bringen, um das Gebäude zu kühlen. Damit kühlen die Nachkühler nun die 23 °C warme Luft nach der Wärmerückgewinnung wieder auf 18 °C hinunter. Stattdessen hätte die Wärmerückgewinnung auch nichts machen und die 18 °C kühle Aussenluft direkt ins Gebäude strömen lassen können.

10.5. Ferienabsenkung

Eine weitere mögliche Massnahme zur Optimierung wäre eine Ferienabsenkung einzuführen. So könnte während den Semesterferien oder Feiertagen die Lüftung weiter reduziert oder ganz ausgeschaltet werden. Es sollte möglich sein, mit den TABS die Temperatur des Gebäudes auf reduziertem Niveau zu halten. Die genaue Umsetzung müsste jedoch noch definiert werden. So sollte das Gebäude nach längerer Ferienzeit rechtzeitig wieder aufgeheizt werden, damit bei Arbeitsbeginn wieder das normale, behagliche Klima herrscht.

11. Optimierung Wärmeerzeugung

Die Auswertung des Strombedarfes der Wärmepumpe vor den Optimierungsmassnahmen ergab eine Energiekennzahl von $7,2 \text{ kWh/m}^2$ (Tabelle 1). Mit einer geschätzten JAZ von 4,3 ergibt dies einen Wärmebedarf des Gebäudes von 73 kWh/m^2 . Die JAZ vor der Optimierung ist höher als im Minergie Antrag, da diese mit einer Auslegungs-Sondentemperatur von $3,9 \text{ }^\circ\text{C}$ berechnet wurde. Mit Messungen wurde aber gezeigt, dass sich diese im Mittel um etwa $10 \text{ }^\circ\text{C}$ bewegt und somit der COP als auch die JAZ besser zu erwarten sind. Insgesamt war der Wärmebedarf des Gebäudes also fast 2,5-mal so hoch, wie im Minergieantrag. Ein Grossteil dieses Mehrverbrauchs ist sicher dem Dauerbetrieb der Lüftungsanlage über 18 Monate anzurechnen. Weiter wird der technische Wärmespeicher auf teilweise über $45 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgeladen, obwohl im Minergieantrag lediglich von einer Vorlauftemperatur von $41 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgegangen wird.

11.1. Verbesserung Bewirtschaftung des Wärmespeichers

Das Heizungssystem besitzt einen technischen Wärmespeicher (2500 l). Der Speicher sollte dabei als Puffer dienen, sodass die Wärmepumpen nicht ständig ein- und ausschalten müssen. Der Speicher sollte abwechselnd ganz geladen und entladen werden. Falsche Parametereinstellungen führten jedoch dazu, dass die Wärmepumpen bis zu 12-mal pro Stunde jeweils kurz einschalteten und der Speicher somit seine Aufgabe als Puffer nicht erfüllen konnte. Dieses Fehlverhalten wurde schon sehr bald aufgedeckt, da die Wärmepumpen nicht nur die Betriebsstunden zählten, sondern auch die Ein- und Ausschaltvorgänge. Dabei zeigte sich, dass die Wärmepumpen viel zu oft einschalteten. Die Speichertemperatur war deshalb auch fast konstant (siehe Abbildung 24). Zusätzlich verkürzte dieser nicht ideale Betrieb mit den ständigen Ein- und Ausschaltungen der Wärmepumpen sicher auch die Lebensdauer der Wärmepumpen.

Bis zur Lösung des Problems dauerte es allerdings lange. Am 14.10.15 wurden gleichzeitig ein Fachmann vom Hersteller der Wärmepumpe sowie der Programmierer der Heizungssteuerung ins Haus bestellt. Gemeinsam wurde das Problem gefunden. Die Ursache waren miteinander in Konflikt stehende Parametereinstellungen. Die Steuerung der Heizungsanlage sollte eigentlich die Kontrolle über das Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe haben, was jedoch durch eine interne Einstellung der Wärmepumpe umgangen wurde.

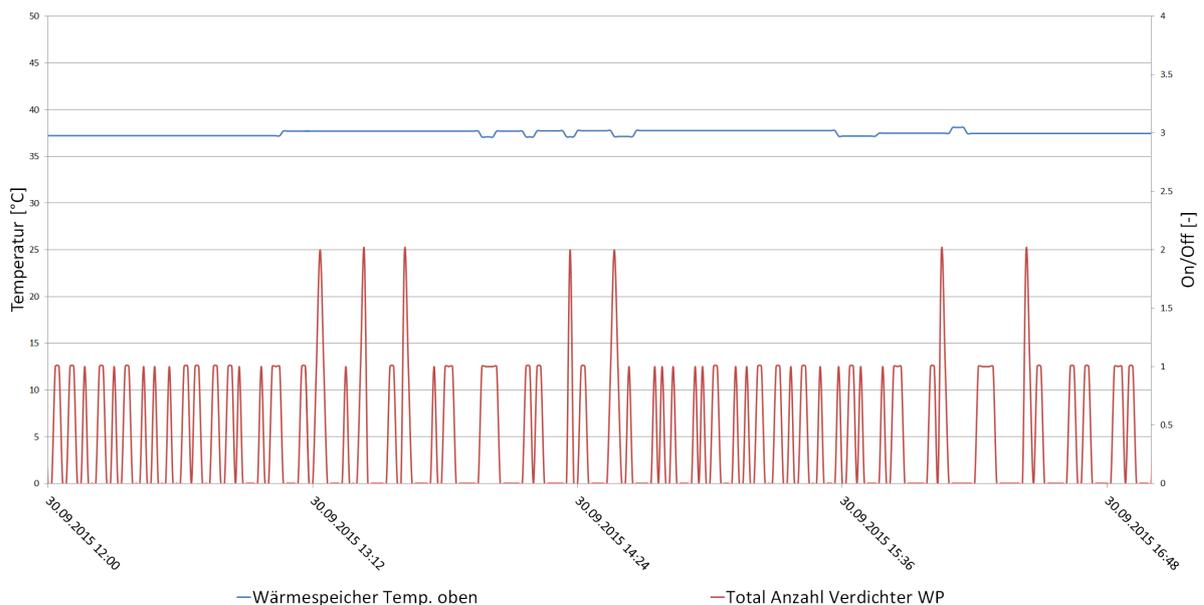


Abbildung 24: Ein- Ausschaltvorgänge der zwei Wärmepumpen und Speichertemperatur

Abbildung 24 zeigt die Ein- und Ausschaltvorgänge am 30.09.15 von 12.00 bis 17.00 Uhr einer Wärmepumpe. Die Wärmepumpe wird hier innert 5 Stunden fast 60-mal eingeschaltet. Gut sichtbar ist auch, ob ein oder zwei Verdichter in Betrieb sind. Maximal möglich wären vier Verdichter von zwei Wärmepumpen.

Die Heizungssteuerung war so eingestellt, dass die Wärmepumpe einschalten sollte, wenn die Temperatur oben im Speicher unter 30 °C fällt und dann erst wieder ausschalten wenn die Temperatur unten im Speicher über 40 °C erreicht. Dieses Ausschaltkriterium wurde jedoch durch die Fehlkonfiguration der Wärmepumpe nie erreicht. Die Wärmepumpe war so eingestellt, dass sie wieder ausschaltet, wenn die Vorlauftemperatur in den Speicher 40 °C erreicht. Diese Einstellung wurde anhand der Minergie-Vorgaben eingestellt, dabei wurde jedoch ignoriert, dass das System einen Speicher besitzt. Diese Vorlauftemperatur von 40 °C wurde jeweils innert weniger Minuten erreicht, dann schaltete die Wärmepumpe wieder aus, obwohl der Speicher noch nicht durchgehend auf 40 °C erwärmt worden war. Danach folgte jeweils eine Sperrzeit von 10 min pro Wärmepumpe. Die Heizungssteuerung sah dann immer noch eine Abweichung vom Sollwert von 40 °C unten im Speicher, weil die Wärmepumpe zu früh ausschaltete. Dadurch wurde die Wärmepumpe nach Ablauf der Sperrzeit von der Heizungssteuerung gleich wieder eingeschaltet. Bei zwei Wärmepumpen ergibt sich damit eine durchschnittliche Taktzeit von 5 min.

Das Problem konnte behoben werden, indem die Einstellungen der Wärmepumpen angepasst wurden. Die Vorlauftemperatur, bei der die Wärmepumpe ausschaltet, wurde so hoch gesetzt, dass dieses Kriterium nie erreicht werden sollte. Das bedeutet, dass nun das Steuerungssystem der Heizung das Mastersystem ist, wie es auch bei der Planung vorgesehen war. Nun wird die Wärmepumpe eingeschaltet, wenn die Temperatur oben im Speicher unter 30 °C fällt, und erst wieder ausgeschaltet, wenn die Temperatur unten im Speicher 38 °C erreicht (Abbildung 25). Diese Abbildung zeigt den Zeitraum von 12.00 bis 17.00 Uhr am 21.10.15. Jetzt wird eine Wärmepumpe nur noch dreimal innert 5 Stunden eingeschaltet, diese läuft dann aber auf Vollast mit 2 Verdichtern. Die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe erreicht dabei Maximalwerte von ca. 45 °C. Das ist allerdings höher als im Minergieantrag vorgesehen. Die Speichertemperatur befindet sich nach der Ladung im Mittel bei ca. 40 °C.

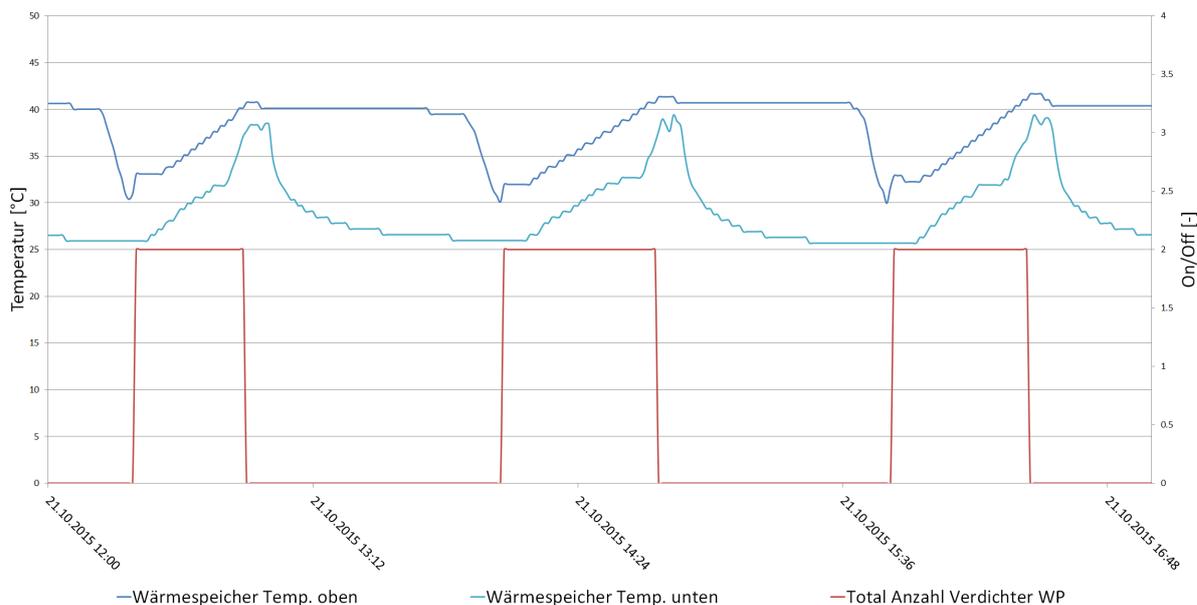


Abbildung 25: Ein- Ausschaltvorgänge der zwei Wärmepumpen und Speichertemperatur nach der Parameteranpassung

Bei tieferen Aussentemperaturen zeigt sich zudem ein Überschiessen der oberen Speichertemperatur auf bis fast 46 °C, das vermindert den COP der Wärmepumpe weiter. Bei der Beobachtung des Ladevorgangs wurde festgestellt, dass die Wärmepumpe das Wasser um über 10 °C erwärmt. Mit diesem grossen Hub ist ein Überschiessen der Temperaturobergrenze fast nicht zu vermeiden. Wenn z.B das Ausschaltkriterium „Temperatur unten > 38 °C“ erreicht ist, hat man oben im Speicher bereits eine Temperatur von ca 48 °C erreicht.

Weiter wurde festgestellt, dass der Durchfluss verbraucherseitig durch den Speicher grösser sein kann als der Durchfluss wärmepumpenseitig. Dies führt zu einer Entleerung des Wärmespeichers während dem Ladevorgang, bzw. der Speicher kann nicht mehr oder nur sehr langsam geladen werden. Mit einer einfachen Überschlagsrechnung kann zudem gezeigt werden, dass die Pumpe zwischen Wärmepumpe und Speicher wesentlich unterdimensioniert wurde. Grund dafür ist, dass in

der Planung mit einem ΔT von 14 °C gerechnet wurde im Gegensatz zu den 6° C, welche real erreicht werden. Die Pumpleistung im Primärkreis (vor dem technischen Speicher) sollte zudem nach Leistung der Wärmepumpen gesteuert werden. Die Temperatur im Vorlauf des Speichers kann ansonstennicht optimal tief gehalten werden.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten

Einemittlere Speichertemperatur von 40 °C ist immer noch zu hoch. Sie sollte nicht höher sein als die höchste Vorlauftemperatur, die in den Heizgruppen benötigt wird (normalerweise gegeben durch die Vorlauftemperatur der Fussbodenheizung). Denn je tiefer die Soll-Speichertemperatur, desto besser wird der COP der Wärmepumpe. Der Sollwert des Speichers sollte also dynamisch an den momentanen Bedarf angepasst werden können. Zudem muss die ganze Hydraulik inklusive Pumpenauslegung und –Steuerung optimiert werden.

11.2. Hydraulik der Erdwärmesonden

Die Erdwärmesonden im Gebäude sind ausgelegt auf ein maximales ΔT von 4 °C im Sondenkreislauf. Das tatsächliche ΔT lag im August 2015 bei Kühlbetrieb jedoch nur bei ca. 0,7 °C oder weniger. Früher wurde festgestellt, dass die Erdsondenpumpe nicht auf den Betrieb der zwei Wärmepumpen reagiert. Unabhängig von der Anzahl laufender Kompressoren, 0 bis 4, lief die Erdsondenpumpe immer konstant mit einer Leistung von 3,2 kW. Im Erdsondenkreislauf ist zwar ein Druckmesser installiert und die Pumpensteuerung zeigt einen Ist- und einen Solldifferenzdruck an, es ändert sich jedoch nichts.

Die Pumpe wird über einen Frequenzumrichter geregelt. Deshalb wurde entschieden die Erdsondenpumpe zurückzuregeln, um den Volumenstrom durch die Erdsonden zu verringern und dadurch das ΔT anzuheben. Gleichzeitig verbraucht die Pumpe so auch weniger elektrische Energie. Von vorher 79 % Leistung wurde die Pumpe auf ein Band von 10 % bis 30 % zurückgeregelt. Der Verbrauch an elektrischer Energie verringert sich dadurch drastisch von 3,2 kW auf nur noch etwa 0,2 kW. Für den Winterbetrieb war diese Einstellung allerdings zu optimistisch. Die Überwachung der Temperaturen ergab ein zu grosses ΔT , wenn sich ein zweiter Kompressor zuschaltete. Die Leistung der Pumpe musste auf 0,5 kW angehoben werden.

Weiter wurde festgestellt, dass die Erdsondenpumpe nicht ausschaltet, wenn die Wärmepumpen ausser Betrieb sind oder wenn im Sommer kein Free Cooling-Betrieb erforderlich ist. Am 14.10.2015 wurden deshalb die Betriebszeiten der Pumpe angepasst. Sie wird weniger oft eingeschaltet und weist auch eine kürzer Gesamtlaufzeit auf. Im Heizfall läuft die Erdsondenpumpe jetzt nur noch zusammen mit der Wärmepumpe. Das führt zu einer weiteren Abnahme von über 60 % an verbrauchter elektrischer Energie.

Vor der Optimierung, zwischen dem 20.05.2015 und dem 12.08.2015 (93 Tage) verbrauchte die Erdsondenpumpe 6131 kWh elektrische Energie. Der über diese Zeitperiode gemittelte Verbrauchswert ist 66 kWh pro Tag. Auf ein Jahr hochgerechnet, ergibt sich ein theoretischer Verbrauch von 24 090 kWh.

Nach der Optimierung, zwischen dem 12.08.2015 und dem 24.08.2015 (12 Tage) verbrauchte die Erdsondenpumpe 61 kWh elektrische Energie. Der über diese Zeitperiode gemittelte Verbrauchswert ist 5 kWh pro Tag. Auf ein Jahr hochgerechnet, ergibt sich ein theoretischer Verbrauch von 1825 kWh. Pro Jahr lassen sich so theoretisch 22 265 kWh einsparen. Dies entspricht einer Einsparung von fast 93 %!

Die Auswirkungen der Anpassungen auf den Energieverbrauch zeigt Abbildung 26.

Energieverbrauch Erdsondenpumpe

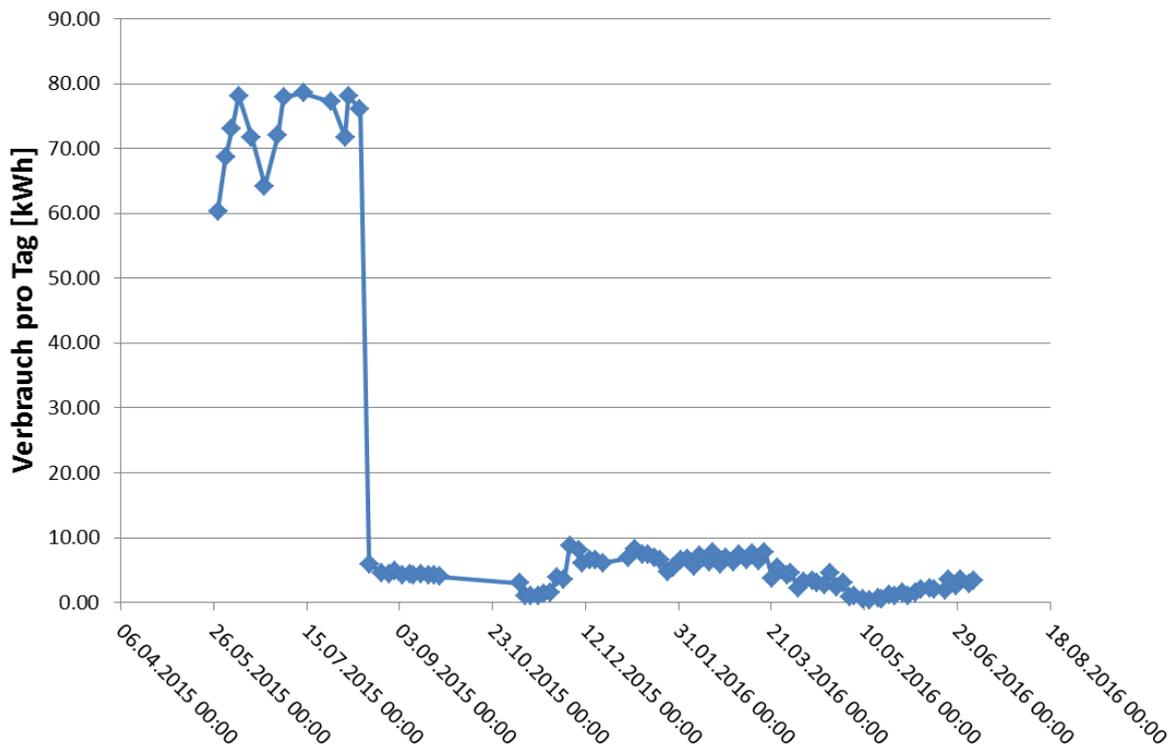


Abbildung 26: Verbrauch an elektrischer Energie der Erdsondenpumpe

Um Schäden an der Erdsondenpumpe zu vermeiden wurde mit dem Hersteller abgeklärt, wie weit die Frequenz bzw. Drehzahl abgesenkt werden darf. In den technischen Daten zur Erdsondenpumpe wird eine minimale Frequenz von 12,5 Hz angegeben. Der Hersteller verlangt jedoch bei externen FUs eine minimale Drehzahl von 300 U/min. In der vorliegenden Konfiguration werden die 300 U/min bereits bei 10 Hz erreicht, was leicht unterhalb des minimal verlangten Volumenstroms von 20 % liegt. Um nicht unter die Herstellerangaben zu fallen und um etwas Reserve zu haben, wurde im FU die minimale Frequenz bei 12,5 Hz eingestellt, was wiederum 25 % Volumenstrom entspricht.

Den gesamten letzten Winter über lief fast ausschliesslich immer nur ein Kompressor. Bei 12,5 Hz (25 %) läuft die Erdsondenpumpe damit mit einer Leistung von noch 140 W. Gegenüber den konstanten 200 W nach der ersten Leistungsanpassung ist das eine weitere Reduzierung um 30 %. Nun wird sich die Leistung der Pumpe nur bei mehr als einem Kompressor erhöhen.

Weitere Optimierungsmöglichkeit Erdsondenpumpe

Optimal wäre eine von ΔT abhängige Regelung der Erdsondenpumpe. Das heisst die Pumpe würde dann versuchen, das optimale ΔT von 4 °C über den Erdsonden zu halten. Wenn mehr Wärme verbraucht wird, nimmt der Volumenstrom automatisch zu. Dazu wäre es allerdings nötig, die Vor- und Rücklauftemperaturen des Erdsondenkreislaufs im Anlagensteuersystem zu erfassen. Diese Temperaturen sind jedoch im Gebäudeleitsystem nicht verfügbar. Es existieren nur analoge Messgeräte. Es müssten daher noch weitere Temperatursensoren installiert und mit dem Gebäudeleitsystem verbunden werden.

Alternativ kann das Gebäudeleitsystem feststellen, wie viele Kompressoren insgesamt in Betrieb sind und anhand dieser Zahl dem FU der Erdsondenpumpe einen bestimmten Prozentwert des Volumenstroms übermitteln. Den insgesamt vier Kompressoren wurden je 25 % des Volumenstromes zugeordnet, da bei diesem Durchfluss das ΔT 4 °C beträgt. Dem FU übermitteln das Gebäudeleitsystem die Summe der Prozentsätze der laufenden Kompressoren und die geförderte Wassermenge wird entsprechend angepasst. Allerdings wird aufgrund der Überdimensionierung immer nur eine WP benötigt, sodass nie mehr als 50 % der maximalen Leistung benötigt wird. Die Erdsondenpumpe ist in jedem Fall sehr stark überdimensioniert.

11.3. TABS

Alle Decken des Hochschulbereiches (Unterrichtsräume und Bürobereich) sind als thermoaktive Bauteile (TABS) erstellt. Darunter wurde eine abgehängte Akustikdecke aus gelochten Gipsplatten montiert. In dieser Hohldecke sind die Komponenten der Lüftung untergebracht. Die Zuluft wird über Schlitzauslässe eingeblasen, die Abluft wird über Fugen der Wände entlang abgesaugt. Die Kombination von TABS und einer abgehängten Decke macht wenig Sinn. Die Wärmeabgabe der TABS an den Raum geschieht hauptsächlich via Wärmestrahlung. Die abgehängte Decke wirkt allerdings als Strahlungsblockade. So erreicht nur ein kleiner Teil der Wärmestrahlung direkt den Raum. Bei einer ganzflächig abgehängten Decke reduziert sich gemäss Weitzmann¹ die Strahlung auf etwa die Hälfte. Nun erwärmen die TABS auch die Luft in Deckennähe. Diese warme Luft wird jedoch durch die Absaugung im Zwischenraum der abgehängten Decke gleich wieder abgesaugt, während die Lüftung in Betrieb ist. Wie gross der negative Effekt genau ist, kann nicht so leicht geklärt werden. Der Einfluss der TABS auf die Raumtemperatur wird auf jeden Fall gehemmt. Für den Sommerfall wurden dazu Messungen gemacht (Kap. 12.3).

Die Grundidee in der Planung war, dass die trägen TABS das Gebäude auf der Solltemperatur halten, während die Lüftung die Raumtemperatur kurzfristig beeinflussen und auf sich rasch ändernde Lasten reagieren kann. Das genaue Zusammenspiel der TABS mit der Lüftung ist jedoch unklar.

Die Vorlauftemperatur zu den TABS wird im Heizfall über eine (sehr flache) Heizkurve geregelt. Das heisst, die Vorlauftemperatur wird anhand der durchschnittlichen Aussentemperatur über die letzten 24 Stunden berechnet. Sie ist nicht beeinflusst durch die Innentemperatur. Das macht eine optimale Einstellung der Heizkurve schwierig. Aufgrund der Beobachtungen wurde die Einstellung der TABS wie folgt geändert: Die Vorlauftemperatur ist konstant 24 °C. Die TABS sind nur nachts in Betrieb mit dem Vorteil, dass die Wärmepumpe dann im Niedertarif läuft und die TABS und die Lüftung sich etwas weniger gegenseitig beeinflussen.

Im Sommer werden die Kühldecken mit einer konstanten, für das ganze Gebäude gleichen Vorlauftemperatur von 20 °C betrieben. Die optimale Einstellung dieser Vorlauftemperatur ist ebenfalls schwierig und basiert auf längerfristigen Beobachtungen der Innentemperatur.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten

Eine andere Option wäre die Regulierung der Vorlauftemperatur zu den TABS nach der kommenden Aussentemperatur, d.h. mit Einbezug der Wetterprognose. Diese Möglichkeit soll in einer weiteren Optimierungsphase geprüft werden.

Da sowohl mit der Lüftung als auch mit den TABS gekühlt und geheizt werden kann, soll noch besser getestet werden, welches System wann und wie betrieben werden soll. Im Fokus der Lüftung stehen primär die Luftqualität (CO₂, Geruch) sowie die Luftfeuchtigkeit. Diese beiden Parameter bestimmen die Luftmengen. Sekundär wird damit auch die Temperatur beeinflusst. Die TABS beeinflussen nur die Temperatur. Diese weiteren Tests sollen dann starten, wenn die Anlage sonst optimiert läuft.

11.4. Fussbodenheizung Wohnungen

Die Überwachung der HLK-Anlagen zeigte auch viel zu hohe Vorlauftemperaturen bei den Fussbodenheizungen der Mieter. Dabei werden Temperaturen von 35 °C regelmässig überschritten. Aber auch Vorlauftemperaturen von über 40 °C werden erreicht. Ein einmaliges Absenken der Heizkurve führte innert weniger als 24 h zu Beschwerden von einem Mieter. Die betroffene Wohnung war tatsächlich kühl. Als Sofortmassnahme wurde die Anpassung der Heizkurve rückgängig gemacht und ein Heizungstechniker aufgebeten. Da sich die Temperatur normalisierte wurde der Heizungstechniker vom Mieter wieder ausgeladen. Weshalb diese Wohnung solche hohen Vorlauftemperaturen benötigt konnte somit noch nicht geklärt werden.

Da das Heizsystem für das gesamte Gebäude, also die Bereiche Wohnungen und Hochschule, aus demselben Wärmespeicher gespeist wird, muss der Speicher von den Wärmepumpen mit zu hohen Temperaturen geladen werden. Damit reduziert sich der COP der Wärmepumpe für das ganze Gebäude.

¹ Peter Weitzmann, Emanuele Pittarello and Bjarne W. Olsen, The cooling capacity of the Thermo Active Building System combined with acoustic ceiling

12. Optimierung Freie Kühlung

12.1. Free Cooling

Wie im Kapitel 6.4 einleitend bereits erwähnt, ist das Erdwärmesondenfeld mit total 5000 m Sondenlänge gegenüber der anhand des Minergiedossiers ableitbaren 2000 m sehr gross gebaut worden. Dies ist aber für das Free Cooling optimal.

Für den Betrieb des Free Cooling sind im Technikraum acht Umwälzpumpen notwendig. Dies sind die Erdsondenpumpe, die Umwälzpumpe für den TABS-Kreislauf, die fünf Umwälzpumpen für die fünf Lüftungszonen und eine weitere Umwälzpumpe zwischen den beiden Wärmetauschern für den TABS- und Erdsondenkreislauf sowie für den TABS- und Kältekreislauf.

Im Free Cooling-Betrieb kann die Leistung nur durch Differenzbildung zweier Zähler (HLK minus ZHAW Privat Lüftung) ermittelt werden. Da auf dem HLK-Zähler aber auch noch einzelne Kleinverbraucher, wie z.B. die Versorgung der Anlagensteuerung angeschlossen sind, kann die elektrische Leistung nicht absolut exakt angegeben werden. Weiter ergibt sich mit den 8 Pumpen eine grosse Anzahl an verschiedenen Betriebszuständen. Abschätzungen und Messungen ergaben schlussendlich eine mittlere Leistung von $ca. 0,95 \text{ kW} \pm 10\%$. Die gemessene Kühlleistung beträgt rund 25 kW. Der COP des Free Coolings über die TABS liegt also bei etwa 26.

Wenn im Lüftungsbetrieb die Zuluft nachgekühlt werden muss, kommen pro Grad Celsius etwa 8 kW Kühlleistung hinzu. Die zusätzliche Pumpleistung beträgt etwa 0,2 kW. COP Werte um 30 sollten mit dem System also möglich sein. Im Sommer 2016 konnte dieser Bedarf jedoch noch nicht genau erfasst werden.

Im Frühling 2016 stellte sich allerdings das vormals eingerichtete Totband zwischen 15 °C und 23 °C als zu gross heraus. Die Kühlung setzte zu spät ein und das Gebäude erwärmte sich langsam. Der Wechsel in den Kühlbetrieb wurde nun auf 18 °C zurück korrigiert. Damit wird das Totband mit 3 °C wieder sehr schmal. Die TABS beginnen nun früh genug zu kühlen mit einer Vorlauftemperatur von 20 °C. In den fünf Lüftungszonen wird jedoch nur gekühlt, wenn die Ist-Temperatur der Zuluft über der Soll-Temperatur liegt.

12.2. Kältemaschine für Spitzenlast

Zur Kühlung steht neben dem Free Cooling mittels des Erdsondenkreislaufs auch noch eine Kältemaschine mit Kältespeicher zur Verfügung. Das Wasser im Kühlkreislauf wird dabei zuerst in einem ersten Wärmetauscher mittels Free Cooling am Erdsondenkreislauf abgekühlt und durchläuft danach noch einen zweiten Wärmetauscher, der an den Kältekreislauf (Kältemaschine und Kältespeicher) angeschlossen ist. Mit dem Kältekreislauf wird nur zusätzlich gekühlt, falls die Kühlleistung mittels Free Cooling nicht ausreicht.

In keinem der drei Sommer 2014 bis 2016 wurde die Kühlleistung der Kältemaschine benötigt. Das Gebäude konnte gänzlich mit Free Cooling klimatisiert werden. Die Betriebsstunden der Kältemaschine belaufen sich deswegen nach 34 Monaten Betrieb auf nur 107 Stunden, das entspricht ziemlich genau 6 Minuten pro Tag. Die Analyse der aus dem Gebäudeleitsystem ausgelesenen Daten zeigt ein Einschalten der Kältemaschine jeden Tag um Punkt 12 Uhr mittags für ca. 6 Minuten, unabhängig von der Aussentemperatur. Abklärungen brachten einen Pumpenblockierschutz hervor, welcher jeden Tag sämtliche Umwälzpumpen und die Kältemaschine für einige Minuten startet. Der Blockierschutz wurde nun in den Niedertarif verschoben und auf 2 Minuten verkürzt (Abbildung 27).

Da die Kältemaschine auch im heissen Sommer 2015 nie lief, wurde sie im Herbst 2016 deaktiviert. Sie soll nun demontiert werden, damit der Raum sinnvoller genutzt werden kann.

Auch der Betrieb des Kältespeichers wird folglich deaktiviert. Durch das tägliche Einschalten der Kältemaschine und der Umwälzpumpen im Kältekreislauf wurde aufgewärmtes Wasser aus den Leitungen von unten in den Speicher gepumpt. Dadurch erhöht sich die Speichertemperatur kurzfristig, bevor sie dann wegen des kalten Wassers wieder absank, welches von der Kältemaschine her nachfloss. Der Kältespeicher war mit Temperaturen zwischen 6,5 °C und 8,5 °C auch konstant zu kalt. Ausgelegt war er für Temperaturen zwischen 11 °C und 16 °C.

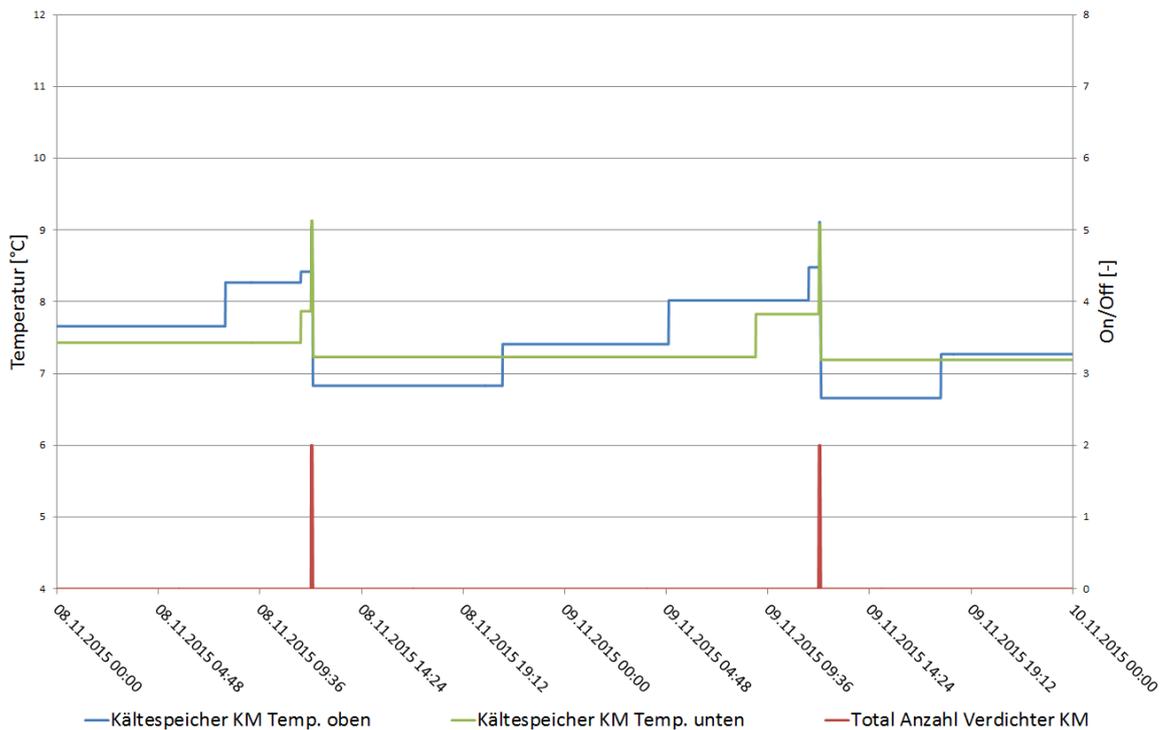


Abbildung 27: Bisheriger Betrieb Kältemaschine über zwei Tage

12.3. TABS

Wie bereits im Kap. 11.3 erwähnt, hemmt die abgehängte Decke den Einfluss der TABS auf das Raumklima. Es wird vermutet, dass im Heiz- wie auch Kühlfall die zwischen Decke und heruntergehängter Akustikdecke strömende Abluft zusätzlich temperiert wird. Im Winter wäre damit die Abluft wärmer als der Raum, im Sommer entsprechend kühler. Zudem wird im HLK-System die Ablufttemperatur als Raumlufttemperatur interpretiert und für die Regelung genutzt. Die Regelung geht im Winter also von zu warmen und im Sommer von zu kühlen Räumen aus und regelt entsprechend dem verfälschten Temperaturwert zu früh zurück. In Abbildung 28 sind diese Überlegungen für den Kühlfall schematisch dargestellt.

Mit einem Datenlogger wurden für den Kühlfall die beiden Temperaturen, sowie die entsprechende Aussentemperatur, eine Woche lang aufgezeichnet (Abbildung 29). Das Messgerät hat eine Toleranz von +/- 0,5 °C. Damit die Temperaturschwankungen von Büro- und der Deckentemperatur guterkennbar sind, wurde die Aussentemperatur zudem auf die Sekundärachse (rechts) gelegt. Wie man erkennen kann, ist die Temperatur in der Hohldecke über den ganzen Zeitraum tiefer (1,3 °C im Mittel) als im Raum. Die Abluft transportiert also einen Teil der Kälte direkt weg. Die gemessene Temperatur im Büro ist im Schnitt rund 1 °C wärmer als die Ablufttemperatur. Zudem sind die Schwankungen der Deckentemperatur in der Hohldecke wesentlich geringer als jene der Bürotemperatur. Dies lässt darauf schließen, dass die TABS mit dem Hohldeckenbereich ein mehr oder weniger abgeschlossenes System bilden und die Kühlleistung nur zum Teil den Bürobereich erreicht. Damit das Free Cooling effektiv wirken könnte, müsste die Hohldecke weitgehend zurückgebaut werden, was mit enormen Kosten verbunden ist und bedingt, dass die Probleme der Raumakustik anders gelöst werden. Damit ist dies weder eine einfache noch eine ökonomische Lösung.

Eine umgekehrte Situation dürfte sich im Winter einstellen, wenn die TABS den Zwischenraum über die Raumtemperatur erwärmen und die Abluft einen Teil der Wärme direkt abtransportieren. Immerhin geht diese Wärme dank der Wärmerückgewinnung zu ca. 75 % nicht verloren.

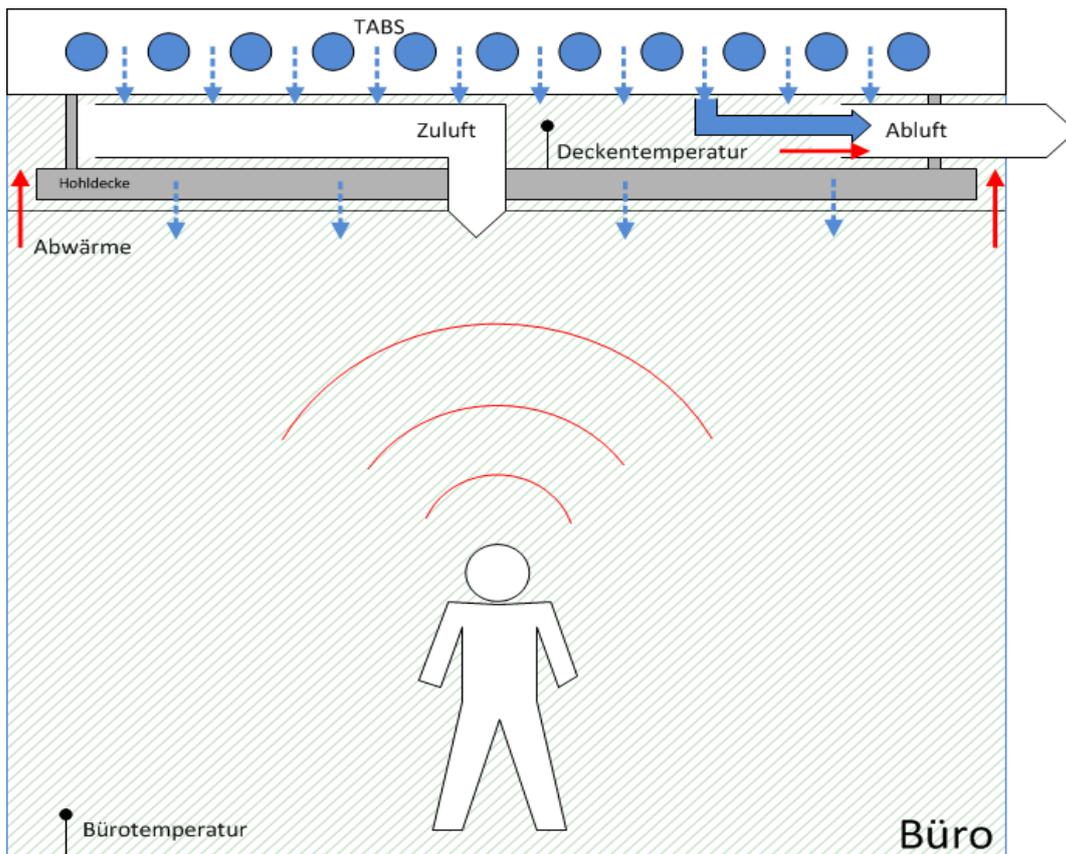


Abbildung 28: Kühlen mit TABS und heruntergehängter Decke

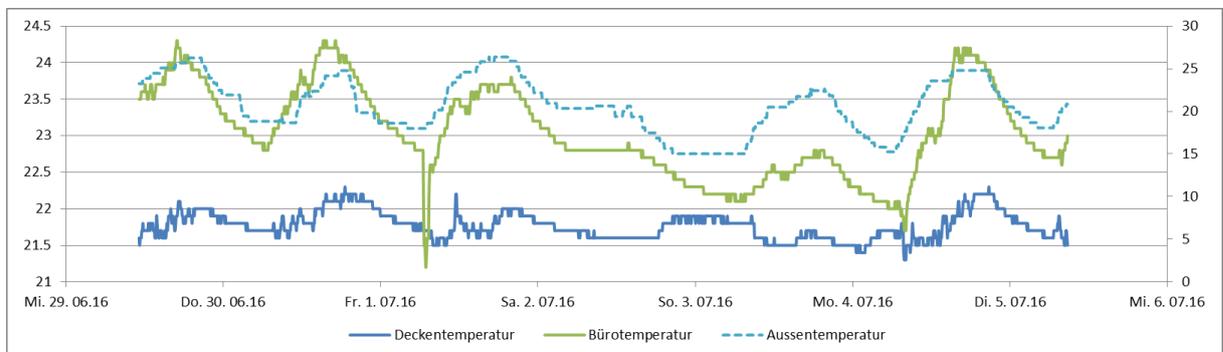


Abbildung 29: Temperaturmessung im Kühlmodus im Büro

Ein weiteres Problem besteht in der Regelung der TABS. Aktuell werden diese bei Temperaturen $> 18\text{ °C}$ im Kühlmodus und bei $< 15\text{ °C}$ im Heizmodus betrieben. Als Referenz-Signal wird die momentane Aussentemperatur verwendet, was gerade im Frühling und Spätsommer zu häufigem Ein- und Ausschalten der TABS führen kann. Da dieses System jedoch sehr träge reagiert und die kühlende Wirkung erst nach mehreren Stunden ausfällt, müsste hier ein anderer Schaltbefehl verwendet werden. Eine Möglichkeit ist z.B. die verzögerte Aussentemperatur, welche jeweils über die letzten 24 Stunden gemittelt wird, zu verwenden. Eine andere Möglichkeit wäre eine vorausschauende Steuerung, welche sich an den Wetterprognosen orientiert. Beide Varianten, die vorausschauende und die verzögerte, würden die grosse thermische Masse des Gebäudes berücksichtigen. Diese und weitere Ideen müssen aber zuerst in einem realen Testlauf validiert werden.

13. Zusammenfassung der Einsparungen

In den bisherigen Kapiteln wurde detailliert auf die verschiedenen Optimierungsmassnahmen eingegangen. Die Tabelle 5 zeigt nun die Tabelle 1, ergänzt um die neuen Werte nach der Optimierung.

	Minergie-Ein-gabe	Ist-Werte vor Opti-mierung	Ist-Werte nach Opti-mierung
Spez. Heizwärme Q_h pro Jahr	29,4 kWh/m ²	73,1 kWh/m ²	34 kWh/m ²
Nennleistung Wärmeerzeugung	114 kW	180 kW	125 kW
gerechnet mit EBF = 4720 m ²			
Elektr. Energie Wärmepumpe	7,2 kWh/m ²	17 kWh/m ²	7,1 kWh/m ²
Elektr. Nennleistung Wärmepumpe	28 kW	42 kW	26 kW
JAZ (Wärmepumpe)	4,09	4,3	4,8
gerechnet mit EBF = 4720 m ²			
Elektr. Energie Lüftung	5,26 kWh/m ²	19,41 kWh/m ²	5,74 kWh/m ²
Elektr. Leistung Lüftung	8,12 kW	10 kW	10 kW
gerechnet mit EBF = 3954 m ²			
Elektr. Energie Erdsondenpumpe	0,48 kWh/m ²	2,61 kWh/m ²	0,11 kWh/m ²
Elektr. Leistung Erdsondenpumpe	1,11 kW	3,2 kW	0,14 kW
gerechnet mit EBF = 4720 m ²			
*Elektr. Energie Freie Kühlung	4,10 kWh/m ²	1,27 kWh/m ²	0,35 kWh/m ²
*Elektr. Leistung Freie Kühlung	- kW	4,07 kW	0,95 kW
* alle Pumpleistungen	gerechnet mit EBF = 3954 m ²		
Strombedarf Total	17,04 kWh/m²	40,29 kWh/m²	13,30 kWh/m²

Tabelle 5: Gegenüberstellung aller Energiekennzahlen vor und nach der Optimierung sowie der Planung

13.1. Bestimmung der Nennleistung Wärmeerzeugung

Beim der Nennleistung der Wärmeerzeugung müssen die Werte folgendermassen interpretiert werden. Die 114 kW wurden nach SIA 384.201 bei -8 °C berechnet. Dem gegenüber stehen die 180 kW Heizleistung, welche mit den zwei Wärmepumpen tatsächlich installiert wurde. Der Ist-Wert nach der Optimierung von 125 kW wurde durch eine lineare Regression zwischen Aussentemperatur und entsprechender Heizleistung errechnet und gilt ebenfalls für -8 °C. Er sollte somit als ein Sollwert interpretiert werden, da die installierte Nennleistung sich nicht geändert hat.

13.2. Bestimmung JAZ

Nach dem Einbau von zwei Rückschlagventilen zählten die Wärmezähler ab dem 27.04.2016 richtig. Für die Periode vom 28.04.2016 bis 07.10.2016 konnte so durch Ablesen des Stromzählers und auswerten der Wärmezählerdaten die Arbeitszahl der Wärmepumpe bestimmt werden. Für diese Periode resultiert eine Arbeitszahl von 4,78, welche nicht zuletzt dank der höheren Erdsonden-Austrittstemperatur höher liegt als im Minergie-Antrag.

Die definitive Messung der JAZ über ein Jahr steht aber noch aus. Infolge der fehlerhaften Wärmezähler konnte diese Messung bisher nicht durchgeführt werden.

13.3. Herleitung Ist-Werte nach Optimierung Erdsondenpumpe

Da im Minergieantrag die elektrische Leistung der Erdsondenpumpe nicht separat aufgeführt wird, wurde mit 4 % (SIA 384/3) der Wärmepumpenleistung gerechnet. Um den spezifischen Strombedarf mit dem Ist-Wert vergleichen zu können, wurde ebenfalls ein zweistufiger Kompressor-Betrieb angenommen.

Im Gebäudeleitsystem konnte nun ausgewertet werden, wie viele Stunden in einem Jahr bei einer Wärmepumpe nur ein respektive beide Verdichter gleichzeitig betrieben worden sind. Entsprechend muss für die Berechnung des Energiebedarfs der Erdsondenpumpe mit 0,56 kW oder 1,11 kW multipliziert werden. Für den Heizfall beläuft sich der spezifische Stromverbrauch auf 0,27 kWh/m². Hinzu kommen aber die Betriebszeiten, in welchen die Erdsondenpumpe für das Free Cooling betrieben wird. Da hier eine klare Definition: „Kühlen wenn $T_{\text{Aussen}} < 20 \text{ °C}$ “ gilt, wurde mittels über 10 Jahre gemittelten Wetterdaten berechnet, wie oft der Zustand am Standort Wädenswil in einem Jahr eintritt. Für die Berechnung des spez. Stromverbrauches der Erdsondenpumpe wurde angenommen, dass für den Kühlbetrieb nur eine Pumpenleistung von 0,21 kW erforderlich ist. Total ergibt sich ein spezifischer Stromverbrauch von 0,48 kWh/m². Vergleicht man diesen Wert nach der Optimierung mit dem Wert im Minergieantrag, wurde hier die Minergie-Vorgabe klar unterboten. Dies ist vor allem auf den wesentlich kleineren Leistungsbedarf der Erdsondenpumpe zurückzuführen, als in der Planung angenommen wurde.

13.4. Energie für Kühlung

Da das Gebäude allein über Free Cooling gekühlt werden kann und die Kältemaschine somit nie in Betrieb war, wird der Strombedarf für Klima aus dem Minergieantrag ebenfalls deutlich unterboten. Dies ist möglich, da wie schon angesprochen die EWS-Länge überdimensioniert wurde. Für den Sommer scheint eine solche Überdimensionierung aber eine interessante Variante zu sein, um keine Kältemaschine mit zusätzlichem Kältekreislauf für den Spitzenbedarf einbauen zu müssen.

14. Schlussfolgerungen

Der Vergleich der von Minergie berechneten Vorgaben mit den gemessenen Werten nach der Optimierung zeigt, dass die Minergie-Vorgaben durchaus anspruchsvoll sind, aber erreicht werden können. So stimmen z. B. der Heizwärmebedarf des Gebäudes (Q_h), der elektrische Energiebedarf der Wärmepumpe als auch der Energiebedarf der Lüftung sehr gut überein. Die Arbeitszahl der Wärmepumpen und somit auch deren JAZ liegen dank der Überdimensionierung der Erdwärmesonden deutlich über den Werten, die für Minergie-Berechnungen anzunehmen sind.

„Einfach so“ wird der Minergie-Standard jedoch nicht erfüllt. Jedes Abweichen im Betrieb vom angenommenen Optimum der Anlagen-Parameter und -betriebsweise führt schnell zu schlechteren Werten. Als Beispiel kann hier die Lüftungsanlage mit Konstant-Volumenstrom herangezogen werden. Die Minergie-Vorgaben können erst mit dem Stosslüftungsbetrieb fast erreicht werden. Ein noch längeres Abschalten der Lüftung würde aber Probleme mit der Luftqualität mit sich bringen. Mit einer bedarfsorientierten Anpassung des Volumenstroms, insbesondere einer Minimierung oder sogar Abschaltung in den Semesterferien, wären die Vorgaben aber auch realisierbar.

Bei der Gebäude-Kühlung zeigt sich, dass mit den Erdwärmesonden über Free-Cooling eine sehr gute und komfortable Kühlung der Nutzräume erreicht werden kann. Die Zuluftkühlung kombiniert über Kühlung mit den TABS gewährleistet ein Raumklima, das selbst im Hochsommer leicht sogar auf zu tiefe Werte konditioniert werden könnte. Eine grosszügige Auslegung der Erdwärmesonden hilft auch hier.

Insgesamt zeigt das Gebäude RA, dass mit heutiger Technik ein sehr tiefer Heizenergiebedarf und sogar fast vernachlässigbar tiefe Werte für den Kühlenergiebedarf erreicht werden können, bei gleichzeitig hohem thermischem Komfort in den Innenräumen.

Es wird aber auch in aller Deutlichkeit klar, dass auch heute noch die Planung solcher Gebäude mit moderner Technik eine Herausforderung darstellt. Die korrekte Auslegung der Leistungen und Komponenten, eine fehlerfreie Hydraulik, der Verzicht auf Angstzuschläge, die sinnvolle Wahl einer Regelstrategie für den Betrieb der Lüftung, aber auch die Planung der notwendigen Einrichtungen zur Anlagenüberwachung resp. die Konzeption der Gebäudeautomation mit Leitebene, scheinen nach wie vor nicht erreichbar.

Ebenso zeigt das Gebäude RA, dass heutige Gebäude nicht ohne eine integrale Planung im Team mit Architekten, Planer der Gebäudetechnik und weiteren Fachspezialisten geplant werden können. Nur so sind unschöne Kompromisse wie die Abdeckung der TABS mit einer Akustikdecke zu verhindern.

Ein weiterer typischer Mangel, der oft zu beobachten ist, ist das Fehlen einer ausreichenden und vollständigen Anlagenbeschreibung und Dokumentation. So fehlen hier ein genügender Regelbeschrieb und ein dokumentiertes Messkonzept.

Noch deutlicher zeigt sich, dass auch Gebäude, die scheinbar recht einfach wirken, nicht ohne eine fachgerechte Betriebsoptimierung in den ersten zwei Jahren nach Inbetriebnahme die angestrebten Zielwerte betreffend Energieeffizienz erreichen können. Zudem hat es die Beteiligten überrascht, wie komplex bereits eine solche Anlage ist und wie schwierig es teilweise ist, Fehler zu finden oder optimale Parameter zu definieren. Hier helfen nur Fachkunde und Messwerte, die korrekt erfasst und sorgfältig ausgewertet werden. Zudem braucht es Zeit und Geduld, um die Auswirkungen von Parameterveränderungen beobachten und einordnen zu können, um die optimalen Einstellungen zu finden. Und manchmal braucht es auch etwas Mut, zum Beispiel hier um auf den intermittierenden Betrieb der Lüftung umzustellen.

Trotz all der erreichten Erfolge gibt es weitere Verbesserungsmöglichkeiten, die in den einzelnen Kapiteln aufgeführt sind. Auch bleiben nach wie vor einige Fragen offen.

14.1. Offene Fragen und Problemstellungen

Wie sich gezeigt hat, konnten im Rahmen dieses Projektes bereits viele Optimierungen mit teilweise erheblichen Einsparungen erzielt werden. Allerdings gibt es immer noch einige gebäudespezifische Problemstellungen oder Sachverhalte, die noch geklärt werden müssen.

Einer dieser Punkte stellt die Vorlauftemperatur der Fussbodenheizung dar. Hier wird zur Zeit eine unüblich hohe Vorlauftemperatur des Gebäudeleitsystems vorgegeben (35 °C bei 10 °C Aussentemperatur). Vergleicht man diesen Wert z.B. mit der „Besonderen Bauverordnung I, § 23“ des Kantons Zürich, welche für Fussbodenheizungen höchstens 35 °C erlaubt, wird schnell klar, dass die jetzigen Einstellungen ungenügend sind. Da bei einer ersten Anpassung der Heizkurve aber Reklamationen von den Mietern eingegangen waren, muss eine erneute Systemoptimierung besser koordiniert und mit den Mietern abgesprochen werden. Der Grund für diese hohe Vorlauftemperatur muss noch herausgefunden werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Anpassung der Vorlauftemperatur an den tatsächlichen Bedarf. Zur Zeit wird der technische Speicher (2500 Liter) jeweils aufgeheizt, sobald die Temperatur am obersten Sensor kleiner als 30 °C ist. Danach wird aufgeheizt bis am untersten Sensor eine Temperatur über 38 °C gemessen wird. Diese Temperatur ist jedoch fast immer höher als der tatsächliche Bedarf, was eine Verminderung des COPs der Wärmepumpe zur Folge hat. Zweckmässiger wäre hier, den Speicher nur auf die höchste im Gebäudeleitsystem verlangte Temperatur zu erwärmen. Dies würde den COP massgeblich beeinflussen und eine weitere Energieersparnis mit sich bringen.

Ein letzter Punkt, der ebenfalls analysiert werden müsste, ist der Grad der Beeinflussung zwischen TABS und Fussbodenheizung in derselben Decke. Dies ist im Gebäude RA zwischen Grossraumbüro und Wohnungen der Fall. Hier ist noch nicht klar, ob und wie die TABS, welche mit einer um ca. 6 – 10 °C tieferen Vorlauftemperatur betreiben werden, auf die Fussbodenheizung wirken.

14.2. Weiteres Vorgehen

Um die im Verlaufe dieses Projektes gefundenen weiteren Optimierungsmöglichkeiten zu untersuchen und realisieren, wird das folgende Vorgehen vorgeschlagen. Damit sollen auch die noch offenen Fragen beantwortet werden können.

Der erste Schritt besteht nun darin, das Gebäude bis zum nächsten Herbst optimiert zu betreiben, jedoch keine weiteren Eingriffe in den Betrieb vorzunehmen. Während dieser Zeit wird das Gebäude überwacht und ausgemessen, um eine gute und belastbare Datenbasis für weitere Analysen zu erhalten.

Anschliessend werden die weiteren Schritte wie folgt geplant.

14.2.1. JAZ Optimierung

Die JAZ wird im Wesentlichen durch die obere Speichertemperatur bestimmt, die heute konstant und zu hoch eingestellt ist. Mit einer Dynamisierung dieser oberen Temperatur auf die oberste im System geforderte Vorlauftemperatur (ev. plus einem bestimmten ΔT) kann während einem beachtlichen Anteil der Heizperiode mit einer tieferen Speichertemperatur als heute gearbeitet werden. Hierzu muss die Programmierung in der Anlagensteuerung angepasst werden, um diese Funktionalität zu ermöglichen.

Jede weitere Optimierung der Temperaturniveaus im System kann sich so direkt auf die JAZ der Wärmepumpe auswirken. Deswegen soll auch vertieft untersucht werden, ob und wie die Vorlauftemperatur zu den Fussbodenheizungen der 4 Wohnungen reduziert werden kann.

Weiter ist die JAZ vom Zusammenspiel der Wärmepumpen mit dem Speicher und den Umwälzpumpen dazwischen abhängig. Die Wärmepumpen müssen den Speicher mit der richtigen Leistung laden

(je nach aktuellem Verbrauch). Zudem müssen die Durchflussmengen im Ladekreis des technischen Speichers genau stimmen, damit eine ideale Schichtung im Speicher erreicht werden kann und die Temperaturen im Ladekreis so tief wie möglich bleiben.

Um dies zu erreichen, könnte über die Wärmezähler der Wärmebedarf des Gebäudes bestimmt werden. Daraus könnte die Anlagesteuerung ableiten, welche Kombination von Kompressoren in den Wärmepumpen gestartet werden sollte, um die richtige Leistung zur Verfügung zu stellen. Um die Temperaturen im Ladekreis zu optimieren, müsste die Anlagesteuerung gleichzeitig die Leistung der Umwälzpumpen anpassen. Für einen derartigen Betrieb haben sich die beiden installierten Umwälzpumpen aber als unterdimensioniert herausgestellt. Diese müssten wohl ausgetauscht werden. Der restliche Teil der Optimierung kann wiederum mit einer Anpassung der Funktionalität in der Anlagesteuerung erreicht werden.

Die Umsetzung dieser Optimierung würde sich direkt minimierend auf den Bedarf an hochwertiger elektrischer Energie auswirken und wäre prinzipiell in allen Systemen mit Wärmepumpe und Wärmespeicher umsetzbar. Die Kosten wären vermutlich vertretbar, da die teuren Komponenten wie die Wärmepumpe und der Speicher belassen werden können.

14.2.2. Integrierte Storensteuerung

Wie in vielen Neubauten, wird auch das Gebäude RA automatisch mit aussenliegenden Lamellenstoren verschattet und so vor Sonneneinstrahlung geschützt. Die Lamellen sind dunkelbraun. An allen Fassaden fahren die Storen automatisch hinunter, sobald die Solareinstrahlung auf die Fassade einen eingestellten Wert überschreitet. Die Storen fahren ganz herunter und öffnen dann die Lamellen auf einen fixen Wert von ca. 45°, um noch etwas Tageslicht hereinzulassen.

Dieses System ist völlig autonom, das heisst es hat keine Verbindung zur Anlagensteuerung der HLK-Anlagen oder zur automatischen Abschaltung der Beleuchtung. Es funktioniert immer gleich, d.h. nimmt weder Rücksicht auf Jahreszeit noch auf die Gebäude- oder Raumnutzung.

Die Storensteuerung kann mit Handtastern in den Nutzräumen pro Raum manuell übersteuert werden. Da die Storen geschlossen herunterfahren und einmal unten auch stark abdunkeln, wird das System sehr oft von den Nutzern übersteuert. Zudem fahren die Storen oft auch im Winter oder auf der Nordfassade herunter, selbst wenn aus Sicht der Gebäudenutzer dies gar nicht notwendig wäre. Das Steuerungssystem der Storen übersteuert die Nutzereingriffe nach ca. einer Stunde jeweils wieder.

Insgesamt führt diese Storensteuerung zu zwei typischen Problemen. Zum einen ist die Nutzerzufriedenheit sehr tief, viele Personen nerven sich ab der aus ihrer Sicht unnötigen Beschattung. Dies insbesondere im Bürobereich auch deshalb, weil für den Blendschutz auf der Fensterinnenseite manuell bedienbare Falmarkisen vorhanden sind. Zum anderen verhindert diese Art von Storensteuerung sehr effizient die Nutzung der passiven Solarenergie im Winter. Dies bewirkt natürlich einen erhöhten Heizwärmeverbrauch und einen Performance Gap zur Berechnung nach SIA 380/1, wo die passive Solarwärme mit eingerechnet wird.

Aus diesen Gründen soll in einem weiteren Teilprojekt eine optimierte Storensteuerung entwickelt werden. Mit Simulationen des Heiz- und Kühlbedarfes und der Tageslichtnutzung in Abhängigkeit der Beschattung sollen optimierte Regelalgorithmen entwickelt werden. Diese sollen dann mit einer neuen Steuerung, welche über das Gebäudeleitsystem mit der HLK-Anlagensteuerung kommunizieren kann und ebenfalls die Anwesenheitsfühler in den Räumen mit einbezieht, realisiert werden. Mit Messungen kann dann der reale Spareffekt ermittelt werden.

In diesem Gebäude soll anschliessend eine weitere Idee getestet werden. Mit der freien Kühlung über die Erdwärmesonden, den TABS und der Lüftung können die Räume sehr effizient und ohne Komforteinbusse auch recht stark gekühlt werden. Heute wird dem Untergrund aber rund viermal mehr Energie entzogen als mit der freien Kühlung regeneriert wird (Kap. 8.2.2). Damit besteht die Gefahr, dass der Boden langfristig auskühlt.

Dieser Sachverhalt führt uns zur zu testenden Idee, das Gebäude auch im Sommer nur so wenig wie unbedingt nötig, oder eventuell gar nicht automatisch gegen Sonnenstrahlung abzuschatten. Der Preis wäre ein erhöhter Kühlbedarf, was zu einer besseren Regeneration des Untergrundes führen würde. Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit des installierten Systems und des nur sehr geringen Stromverbrauchs der Erdsondenpumpe würde dies umgekehrt kaum zu einem erhöhten Strombedarf führen. Die Nutzer könnten bei Bedarf jederzeit manuell die Storen hinunterfahren.

Neben einer besseren Regeneration des Untergrundes und damit der Sicherstellung der langfristig möglichen Nutzung der Erdwärme mit hohem COP könnte auch die Tageslichtnutzung verbessert werden, was wiederum Strom und Unterhaltskosten spart. Weiter würde die freie Sicht auf den See resp. ins Grüne öfter ermöglicht. Die Storen würden nicht mehr die Gebäudenutzer mit zu häufigem Hinunterfahren oder zu rascher Korrektur der Nutzereingriffe stören. Die Nutzerzufriedenheit und der Komfort könnte so erhöht werden und ein manuelles Übersteuern des Systems würde kaum mehr nötig sein. Ein Behaglichkeitsgewinn durch eine weniger intensive Verschattung würde also mit einer langfristigen Nutzbarkeit des Untergrunds belohnt (Win-Win-Situation).

Wir vermuten in der Realisierung solcher Konzepte, bei welchen ein Gebäude sehr effizient mit freier Kühlung über Erdwärmesonden und Deckenheiz-/kühlsysteme oder TABS gekühlt werden kann, ein grosses Potential. Solche Gebäude würden im Sommer quasi als Solarkollektoren genutzt, um das Erdreich zu regenerieren. Im Winter könnte optimal passive Solarenergie genutzt und der Restwärmebedarf mit einer Wärmepumpe mit hoher Arbeitszahl und sehr geringem Strombedarf gedeckt werden. Dieses System wäre echt nachhaltig, da es beliebig lange betrieben werden kann, ohne die Gefahr der langfristigen Auskühlung des Bodens.

14.2.3. Regelung bei zwei Heiz-/Kühlsystemen

Im Gebäude RA können die Nutzräume sowohl mit der Lüftung wie auch mit den TABS beheizt oder gekühlt werden. In solchen Fällen stellen sich folgende Fragen:

- Wie kann gleichzeitiges Heizen und Kühlen verhindert werden (z. B. TABS heizen, Lüftung kühlt)?
- Wie wird eine optimale Arbeitsteilung Lüftung/TABS beim Heizen erreicht?
- Wie wird eine optimale Arbeitsteilung Lüftung/TABS beim Kühlen erreicht?
- Wie können pro Raum schwankende interne und externe Lasten am besten aufgefangen werden? Mit der Lüftung (wie muss diese dann geregelt werden)? Oder mit dem Selbstregelleffekt TABS?
- Wie wird die Vorlauftemperatur TABS (Heiz- und Kühlkurve) am besten geregelt? Was spart eine Regelung dieser Vorlauftemperatur nach kommender (nach Wetterprognose) statt vergangener Aussentemperatur? Muss die Sonnenstrahlung mit berücksichtigt werden?
- Wie wird die Zulufttemperatur am besten geregelt? Reicht eine Zulufttemperatur-Regelung pro Zone, oder wäre dies pro Raum erforderlich? Ist das machbar?

Uns scheint, dass hier noch Forschung erforderlich ist. Da wir das Gebäude RA als Versuchsobjekt nutzen können, könnten hier neue Funktionalitäten der Storensteuerung getestet und deren Auswirkungen sowohl auf die Energieverbrauch als auch auf die Nutzerzufriedenheit und den Komfort erhoben werden.

14.2.4. Regeltechnik

Wie die beiden vorangehenden Kapitel 14.2.1 und 14.2.2 aber auch das gesamte Optimierungsprojekt zeigen, können viele Effizienzsteigerungen durch eine Anpassung der Regeltechnik erreicht werden. Es stellt sich die Frage, ob Anforderungen an die Regelung von Anlagen definiert werden können. Solche Anforderungen müssten z.B. vorgeben,

- welche Komponenten eines Systems abhängig vom Bedarf gesteuert werden sollten
- wie Umwälzpumpen gesteuert werden um die Massenströme zu optimieren
- wie Systemkomponenten zusammenarbeiten müssen.

Die Inbetriebnahme müsste die auch Erfüllung dieser Anforderungen an die Anlagensteuerung abfragen und bei der Abnahme müssten die verlangten Funktionalitäten ausgetestet werden. Es müsste möglich sein, eine Aussage zur erwarteten Systemeffizienz machen. Die Effizienz der einzelnen Komponenten, aber insbesondere auch die Systemeffizienz sollte überprüft werden.