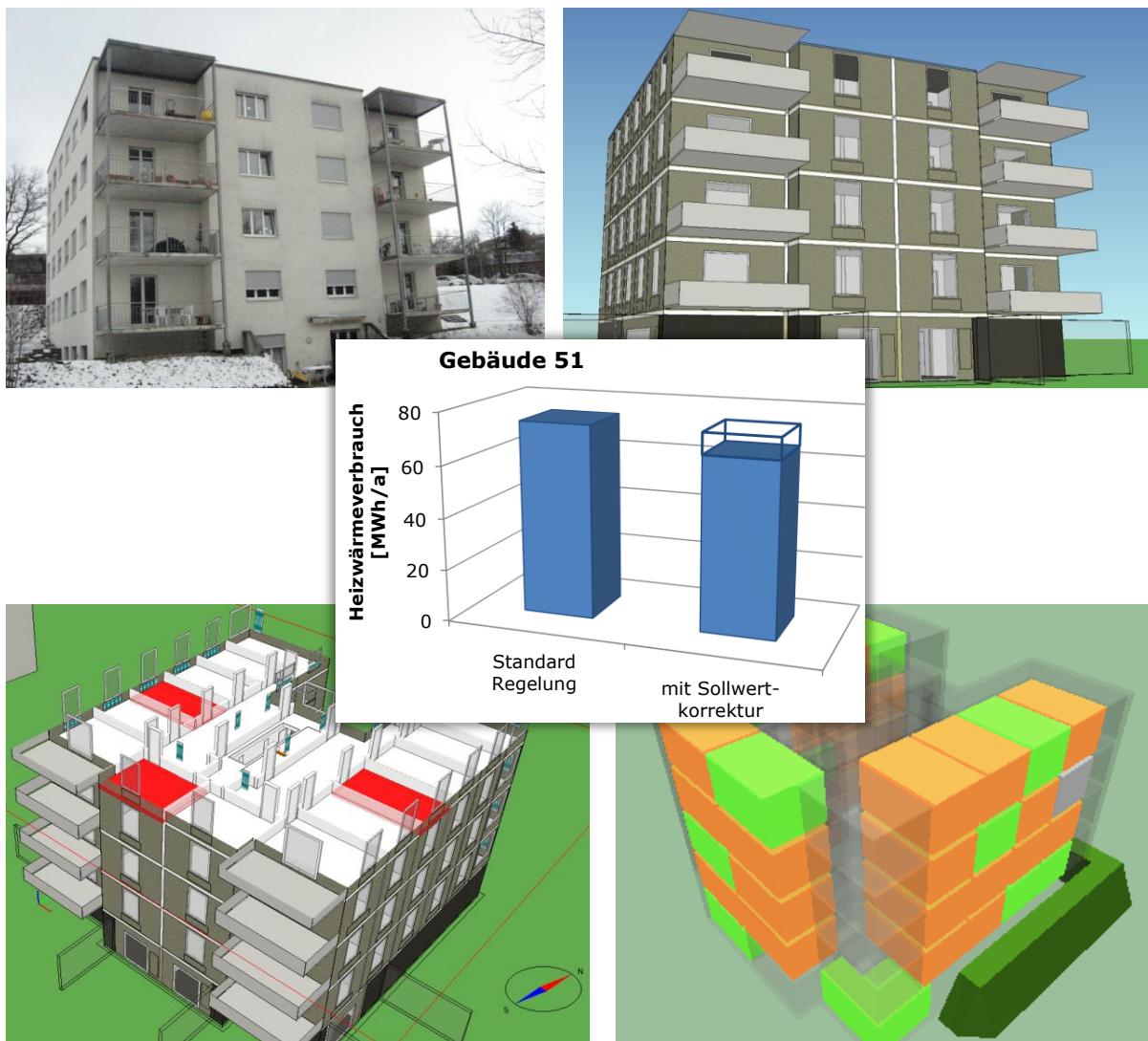




Schlussbericht 13.07.2015

Pilot- und Demonstrationsprojekt - Optimierung bestehender Vorlauftemperaturen und Einzelraum-Heizungsregelung mittels wetterprognosebasierter Korrekturalgorithmen

“Epinettes 51”



Subventionsgeberin:

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

Kofinanzierung:

Stiftung Apartis, CH-1700 Freiburg
Aquametro AG, CH-4106 Therwil (Messgeräte)

Subventionsempfänger:

Pronoó GmbH
Route André Piller 19
1762 Givisiez
www.pronoo.ch

Autoren:

Urs Grossenbacher, Pronoó GmbH, urs.grossenbacher@pronoo.ch

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, Leiterin P+D-Programm
yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung: Marc Köhli, Stv. Leiter Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
koehli@enerconom.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/500990-01

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

Zusammenfassung

Das von Pronoó weiterentwickelte Konzept der prädiktiven Heizungsregelungsoptimierung greift mit Sollwertkorrekturen in die bestehenden Regulierungseinrichtungen ein und korrigiert deren Sollwerte vorausschauend. Zur Berechnung dieser Korrekturwerte werden Wetterprognoseredaten von kommerziellen Anbietern im Stundenintervall gelesen und über einen Algorithmus verarbeitet. Dieser beinhaltet gebäudespezifische Parameter, welche teils empirisch und teils mittels dynamischer Gebäudesimulation ermittelt werden. Die im Stundenintervall berechneten Daten werden einerseits individuell pro Raum über die elektronische, internetbasierte Einzelraumregelung auf die Raumtemperatursollwerte und andererseits über die zentrale Vorlauftemperaturregelung mittels einem eigens zu diesem Zweck von einem Projektpartner entwickelten Hardwaremodul (EcoGateway) auf die bestehende Heizungsinstallation angewendet.

Der Funktionsnachweis im realen Gebäude konnte im Rahmen der Heizperiode 2014/15 erbracht werden (ein Jahr später als ursprünglich geplant). Während die Anwendung des Sollwertkorrekturen auf die Einzelraumregelung aufgrund des Wärmeverteilkonzept der Heizungsinstallation praktisch keinen Einfluss hatte, konnte mit der optimierten Regelung der zentralen Vorlauftemperatur ein Effizienzpotential von 10% nachgewiesen werden (geschätzte 15% - 20% zusammen mit funktionierender Einzelraumregelung), ohne dass dabei die Raumtemperaturen signifikant reduziert worden wären. Dieses Resultat konnte auch an einem an die Realität angeglichenen und weitgehend validierten Gebäudesimulationsmodell gezeigt werden.

Résumé

Pronoó a mis en place un concept d'optimisation prédictive du réglage de chauffage. Le concept prévoit une influence directe des systèmes de régulation en place en imposant une correction des valeurs de consigne déterminée par des algorithmes hébergés sur des serveurs. Les algorithmes tiennent compte de paramètres descriptifs du bâtiment (identifiés empiriquement et par simulation) et des pronostics météorologiques. Une fois par heure les corrections sont calculées pour les pièces (vannes thermostatiques connectées) et pour la température de départ de l'installation de chauffage central (EcoGateway, électronique spécialement conçue pour Pronoó).

Le bon fonctionnement du concept dans un bâtiment réel a pu être vérifié durant la période de chauffe 2014/15 (une année plus tard qu'initiallement prévu). Alors que l'application d'un offset était négligeable sur les radiateurs (dû au concept de la distribution de chaleur) nous avons pu constater un potentiel d'économie de 10% grâce à l'optimisation de la régulation centrale (estimative 12% - 20% y.c. régulation fonctionnel dans les pièces) sans pour autant réduire les températures dans les pièces. Ce même résultat a pu être confirmé par simulation.

Abstract

Pronoó has created a concept of predictive optimization of heating controls. The existing regulation systems are directly influenced by superposing an offset computed by algorithms hosted on servers to the set point value of the heating system. The algorithms take into account building-specific parameters and weather forecast. Once an hour the offsets are computed for the rooms (radiators and connected valves) and for the central heating system (EcoGateway, control of the forward temperature via a specialized hardware).

The proper functioning of the concept in a real building could be verified during the heating season 2014/15 (one year later than initially planned). The distribution of the heat in the buildings limits the influence of the radiators to zero but thanks to the optimisation of the central heating system we reached an economy of 10% (we estimate 15% - 20% together with working room temperature control) maintaining the same comfort in the rooms. This result has been verified and confirmed by simulation.

Inhaltsverzeichnis

1. AUSGANGSLAGE UND AUFGABENSTELLUNG	5
1.1. Projektorganisation.....	5
1.2. Studienobjekt „Epinettes“	5
2. GEBÄUDEDATEN	6
2.1. Thermische Gebäudehülle.....	6
2.2. Haustechnische Installationen.....	7
2.2.1. Überblick	7
2.2.1. Problematik aufgrund der Einrohrheizung	8
2.3. Messtechnik	9
2.4. Erfahrungswerte der Energieverbrauchsdaten	9
2.4.1. Heizölverbrauch	9
2.4.2. Gebäudeenergieausweis GEAK	10
3. PROJEKTBESCHRIEB	11
3.1. Zeitlicher Ablauf	11
3.2. Technisches Konzept.....	11
3.2.1. Einzelraumregulierung	12
3.2.2. Vorlauftemperaturregulierung	13
3.2.3. Wetterprognosenedaten.....	14
3.2.4. Erfahrungsbasierte Berechnung der Sollwertkorrekturen	14
3.2.5. Deterministische Berechnung der Sollwertkorrekturen.....	15
4. ERFOLGSKONTROLLE.....	17
4.1. Konzept.....	17
4.1.1. Vergleichende Messungen.....	17
4.1.2. Gebäudesimulationsmodell	18
4.2. Ergebnisse aus den realen Betriebsdaten	19
4.2.1. Heizwärmeverbrauchsmessung im Vergleich zwischen den Gebäuden	19
4.2.2. Heizwärmeverbrauchsmessung im Vergleich zwischen Intervallen	22
4.2.3. Funktionsanalyse im Detail	23
4.2.5. Verhalten der Raumtemperaturen.....	24
4.3. Ergebnisse aus dem Simulationsmodell	26
4.3.1. Heizwärmeverbrauch	26
4.3.2. Raumtemperaturen	27
5. AUSBLICK.....	29
ANHANG.....	29

1. Ausgangslage und Aufgabenstellung

1.1. Projektorganisation

Der Projektname „Epinettes 51“ ist die Postadresse eines Mehrfamilienhauses im Freiburgischen Marly. Das Gebäude aus den 80er-Jahren ist eines von drei baugleichen Liegenschaften, welche von der Stiftung Apartis verwaltet werden und in erster Linie kostengünstige WG-Wohnungen an Studierende der Uni Freiburg zur Verfügung stellen.

Sämtliche 20 von Apartis verwalteten Gebäude im Grossraum Freiburg weisen ein Einzelraum-Regelungssystem auf, welches jedes einzelne Heizkörperventil, das mit einem entsprechenden motorischen Ventilantrieb ausgerüstet ist, über ein Datenprotokoll via Internet sichtbar macht. Die so ausgestatteten Räume verfügen damit auch über einen Raumtemperaturfühler, dessen Messwerte seit mehreren Jahren im Stundenintervall geloggt werden.

Die Stiftung Apartis ist gegenüber neuen Technologien sehr aufgeschlossen und verfolgt bei der Verwaltung ihrer Liegenschaften kompromisslos eine auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Strategie. Dies ermöglichte uns als junges Start-Up Unternehmen, die Idee der Optimierung der Heizungsregulierung in Funktion der Wetterprognosedaten weiter zu entwickeln und unter realen Betriebsbedingungen zu testen.

Damit ergab sich folgende Projektorganisation:

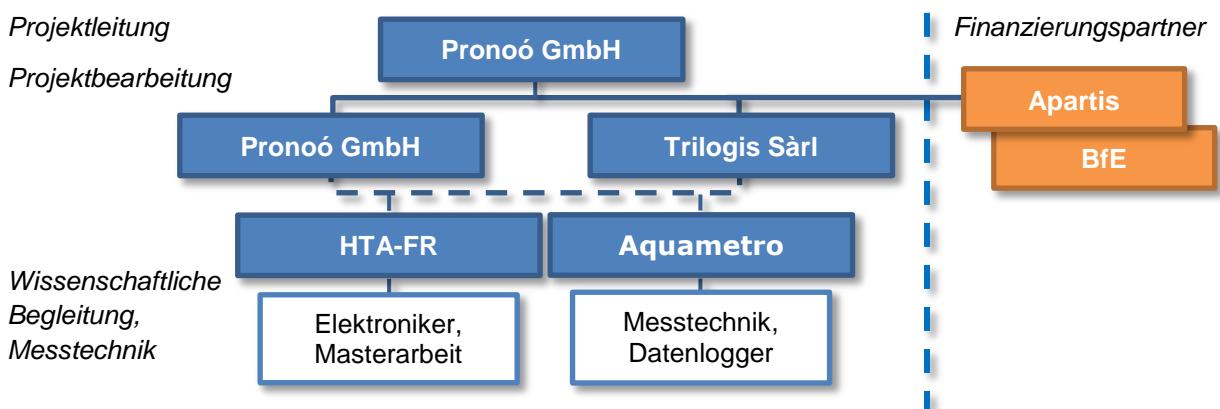


Abbildung 1: Organigramm der am Projekt beteiligten Firmen und Organisationen.

1.2. Studienobjekt „Epinettes“

Die Stiftung für Studentisches Wohnen *Apartis* in Freiburg ist Eigentümerin und Verwalterin von 25 Liegenschaften in und um die Stadt Freiburg. Dabei handelt es sich um Mehrfamilienhäuser, welche kostengünstiges Wohnen an gut erreichbarer Lage ermöglichen. Die Wohnungsgrundrisse sind sowohl für Wohngemeinschaften als auch für Familien konzipiert.

Die Verwaltung sah sich oft mit verantwortungslosem und nicht tolerierbarem Nutzerverhalten konfrontiert was die Raumheizung anbelangt. Mieter, welche im Winter für zwei Wochen in die Ferien fahren und während dieser Zeit das Fenster offen stehen lassen, war keine Seltenheit. Um solche und ähnliche Situationen besser in den Griff zu kriegen, investierte Apartis schon im Jahr 2011 in eine elektronische Einzelraumregelung mit Anbindung ans Internet von der Firma Trilogis. Damit wurde erreicht, dass unplausible Raumtemperaturen erkannt und Sollwerteinstellungen begrenzt werden konnten.

Es war unter anderem das Vorhandensein dieses Einzelraumregelungskonzepts in mehreren Hundert Zimmern seit bereits einigen Jahren sowie die entsprechende Aufzeichnung von Raumtemperaturdaten, welche die Grundlage für die Lancierung des vorliegenden Projekts lieferte. Die Firma Pronoó gelangte daher an Trilogis und Apartis mit der Idee, die vorhandene Regeltechnik dahingehend zu optimieren, indem die Raumtemperatur-Sollwerte in Abhängigkeit der Wetterprognosedaten vorausschauend korrigiert werden.

Hinsichtlich der Erfolgskontrolle wurde daraufhin die Überbauung „Epinettes“ im Freiburgischen Maly aus dem Jahr 1996 ausgewählt, weil sich hier unter Anderem die Möglichkeit zum Quervergleich zwischen drei identisch gebauten und betriebenen Gebäuden bietet.

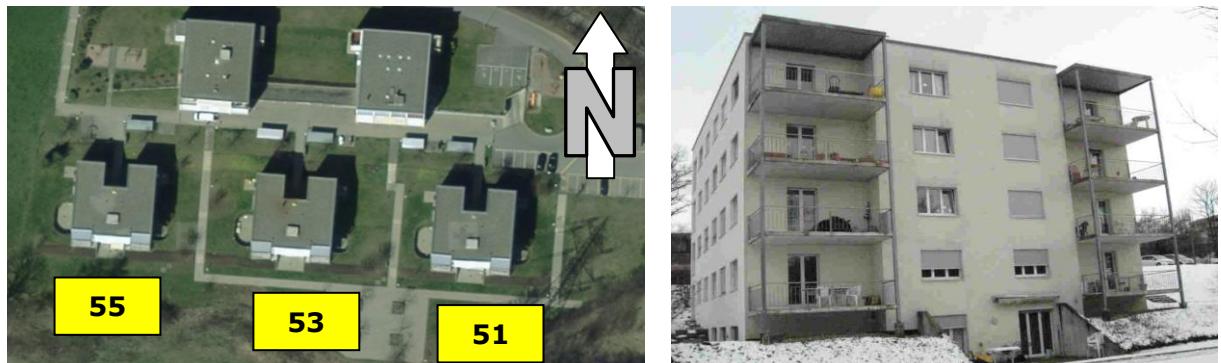


Abbildung 2: Übersicht der Überbauung Epinettes (links) sowie Ansicht der Südfassade von Haus 51 (rechts)

Nebst der vorausschauenden Korrektur der Raumtemperatursollwerte über die vorhandene Einzelraumregelung soll zusätzlich die witterungsgeführte Vorlauftemperatur dynamisch optimiert werden. Dazu soll der bestehende Kompaktregler nicht ausgewechselt, sondern mit einem von Pronoó und der Hochschule für Technik und Architektur Freiburg (HTA-FR) entwickelten Hardwaremodul ergänzt werden. Dieses Gerät mit dem Namen EcoGateway liefert die Möglichkeit, den Temperaturwert des Vorlauftemperaturfühlers zu lesen, dazu einen Offset (in [K]) zu addieren und den auf diese Weise manipulierten Temperaturwert dem bestehenden Regler in Form eines emulierten Widerstandswertes zur Verfügung zu stellen.

Das in diesem Bericht beschriebene Projekt hat zum Ziel, die Machbarkeit der vorausschauenden Sollwertkorrektur bei bestehenden Heizungsinstallationen zu zeigen und den Nutzen zu quantifizieren.

2. Gebäudedaten

2.1. Thermische Gebäudehülle

Die Qualität der thermischen Gebäudehülle entspricht dem damaligen Standard. Der Gebäudeenergieausweis (GEAK) weist einen spezifischen Heizwärmebedarf Q_h^1 von $46 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ aus, was der Energieeffizienzklasse C entspricht.

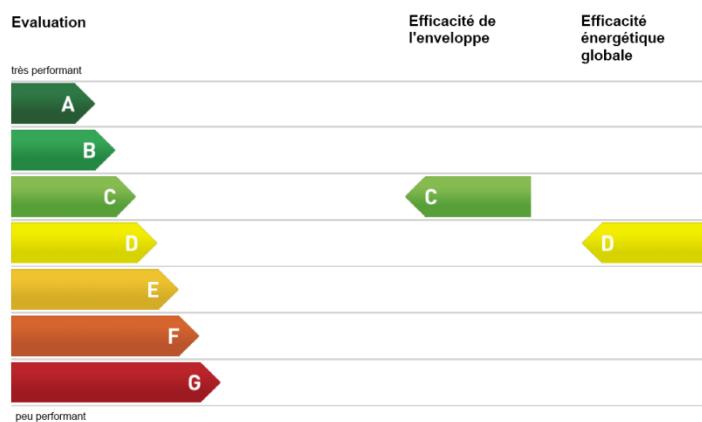


Abbildung 3: Spezifikation der Energieeffizienzkategorie gem. Standardisiertem GEAK-Verfahren.

¹ Stufe Nutzenergie

2.2. Haustechnische Installationen

2.2.1. Überblick

Wärmeerzeugung: Ölheizkessel in Gebäude 53 mit ungeregelter Fernwärmeleitung zu den benachbarten Gebäuden.

Primärregelung Heizung: Eine Heizgruppe pro Gebäude mit witterungsgeführter Vorlauftemperaturregelung nach der Einspritzschaltung.

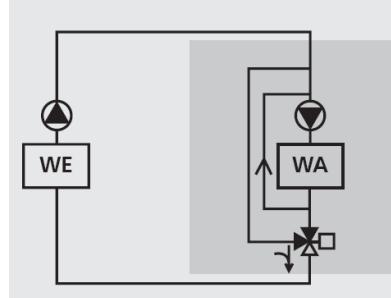


Abbildung 4: Hydraulikschema der Einspritzschaltung (Quelle: Gebäudetechnik Systeme integral planen, energieschweiz / ENDK 2012)

Sekundärregelung Heizung: Elektronische Einzelraumregelung mit Raumfühler in der Raummitte und batteriebetriebenem motorischen Ventilstellantrieb auf Heizkörperventil (Hardware: Honeywell).

Hydraulikkonzept Wärmeabgabe: Einrohrheizung mit zwei Erschliessungsringen pro Wohnung im Unterlagsboden und 3 bis 4 Heizkörpern pro Ring. (s. auch folgender Abschnitt)

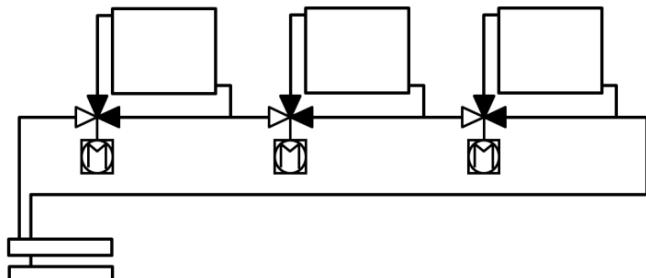


Abbildung 5: Prinzipschema der hydraulischen Erschliessung der Heizkörper nach dem sog. Einrohrsystem².

Warmwasser: 600-Liter-Boiler pro Gebäude mit innliegendem Heizregister zur Ladung ab ungeregelterem Vorlauf mittels Umlenkventil.

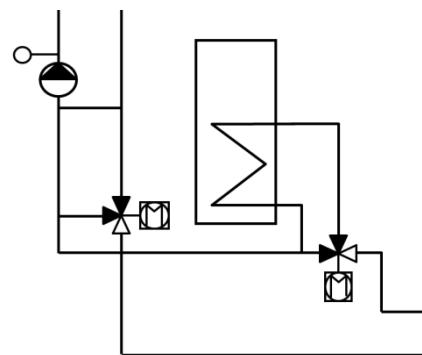


Abbildung 6: Prinzipschema der Warmwassererwärmung pro Gebäude.

Warmhaltung Warmwasserverteilung: elektrische Begleitheizung mit Temperaturregelung und Zeitplan

Wasseraufbereitung: Die Warmwassererwärmung wird mit teilenthartetem Wasser gespiesen:

- Rohwasserhärte: 32°f
- eingestellte Wasserhärte nach Verschnittventil: 7.2°f

Lüftung:

- Küchenabluft nach Aussen
- Abluft Nasszellen (Betrieb über Lichtschalter gesteuert)

² s. komplettes Prinzipschema in Angang A

2.2.1. Problematik aufgrund der Einrohrheizung

Das Installationsprinzip der Einrohrheizungen wurde früher oft angewendet, um Rohrlaufmeter und Installationsaufwand zu minimieren. Aufgrund der Tatsache, dass damit mehrere Heizkörper unterschiedlicher Zonen in Serie geschaltet werden, leuchtet es sofort ein, dass die bei solchen Installationen eingesetzten thermostatischen Heizkörperventile Dreiwegventile sein müssen. (vgl. Skizze in vorhergehendem Abschnitt). Damit ist aber auch klar, dass bei in Betrieb stehender Gruppenpumpe der Volumenstrom in den Erschliessungsleitungen der Heizkörper immer vorhanden ist. Das wiederum führt bei ungenügend gedämmten, im Unterlagsboden verlegten Leitungen zu einer Wärmeabgabe analog einer Fussbodenheizung. Und diese Wärmeabgabeleistung ist einzig und alleine durch die Vorlauftemperatur bestimmt bzw. regelbar.

Dieser Sachverhalt wurde im Zwischenbericht vom Juli 2014 detailliert untersucht und beschrieben. Dabei konnte insbesondere gezeigt werden, dass die vorhandene Einzelraumregelung mit Anbindung der einzelnen Regelkreise ans Internet zwar zur Vermeidung von sinnlosen Wärmeverlusten (z.B. bei lange offenstehenden Fenstern) dient, aber dass die eingestellten Sollwerte im normalen Betrieb praktisch immer von den Istwerten überschritten sind und daher fast keine Regelautonomie vorliegt.

Deshalb ist das zu Projektbeginn vorgesehene und auch realisierte Konzept der wetterprognosebasierten Korrektur der Raumtemperatursollwerte (vgl. Abschnitt 3.2.1) in diesem Fall beinahe wirkungslos. Die Funktion wurde deshalb nicht ausser Betrieb genommen aber bei der Interpretation der Verbrauchsmessungen zur Erfolgskontrolle wird nicht weiter darauf eingegangen, weil der Einfluss nicht messbar ist.

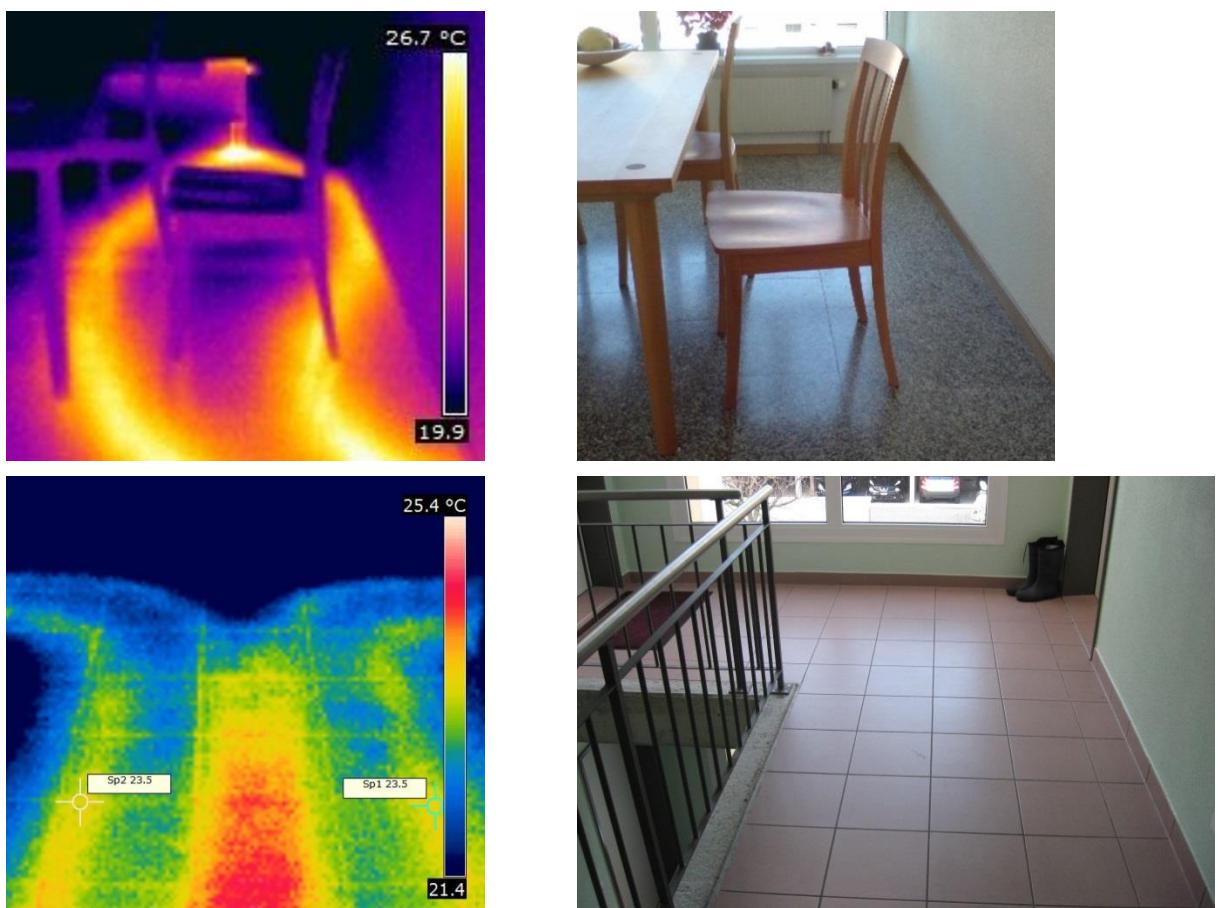


Abbildung 7: Darstellungen des Fußbodenheizungseffekts von Heizkörpererschliessungen mit dem Einrohr-System. Oben: Ein Esszimmer einer Wohnung eines anderen Gebäudes mit demselben Installationsprinzip, wo sehr gut der kalte Heizkörper aber die warmen Erschliessungsleitungen sichtbar sind. Unten: Treppenhaus Epinettes 51 mit den Leitungen im Unterlagsboden zur Erschliessung der Wohnungen.

2.3. Messtechnik

Die Gebäude sind nicht mit einer verbrauchsabhängigen Heizkostenabrechnung (VHKA) ausgerüstet. Dasselbe gilt für den Wasser- und Warmwasserverbrauch. Der Stromverbrauch wird pro Wohnung bzw. für den allgemeinen Teil (Korridore, usw.) individuell erfasst.

Ursprünglich wurden Wasser- und Heizölverbrauch einzig über die Ablesedaten des kommunalen Wasserversorgers bzw. über die Lieferscheine des Heizöllieferanten sowie quartalsweisen Tankfüllstandsablesungen des Abwärts von der Verwaltung erfasst und aufgezeichnet. Eine professionelle Auswertung im Sinne einer Sommer-/Winter-Differenzierung sowie einer Klimakorrektur über die monatlich publizierten Heizgradtage hingegen fehlte.

Unabhängig von dem in diesem Bericht beschriebenen Projekt, ist sein November 2012 eine elektronische Tankfüllstandsmessung in Betrieb. Das System der Firma Silentsoft übermittelt etwa 6 mal pro Tag mittels GSM eine Niveaumessung auf einen Server. Die von Trilogis betriebene Plattform UpLogs übernimmt diese Messdaten und liefert einerseits eine 1:1-Abbildung sowie eine monatliche Summierung mit einer Division durch die Heizgradtage. Hierzu wird vorher eine Konstante Menge subtrahiert, um den witterungsunabhängigen Verbrauch der Warmwassererwärmung approximativ zu eliminieren.

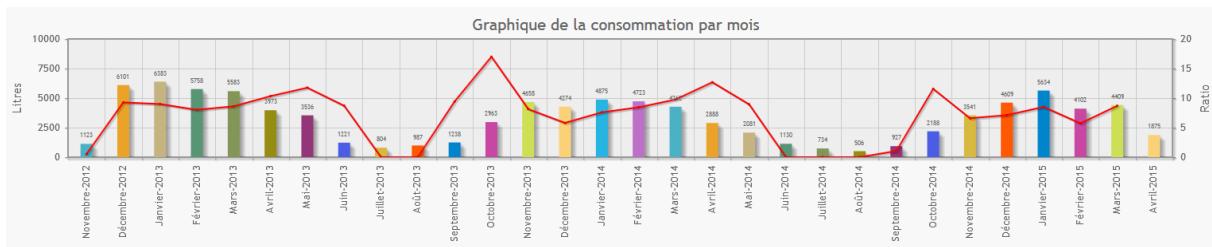


Abbildung 8: Darstellung der Heizölverbrauchsdaten auf der Internetseite UpLogs von Trilogis in Monatsverbrauchsdaten (Balkengrafik) und das Verhältnis zu den Heizgradtagen nach vorheriger Subtraktion des Bandlastverbrauchs (rote Linie).

2.4. Erfahrungswerte der Energieverbrauchsdaten

Vorausblickend auf die Erarbeitung der Erfolgskontrolle wurde auf verschiedene Wege Versucht, die Istsituation bezüglich des Heizwärmeverbrauchs möglichst genau und plausibel abzubilden. Dazu wurden die Resultate verschiedener Denkansätze miteinander verglichen, welche im Folgenden erläutert sind.

2.4.1. Heizölverbrauch

Auf Basis der Informationen der Verwaltung vor der Installation der permanenten Tankfüllstandsmessung und der anschliessenden Auswertung letzterer wurde versucht, ein auf Standard-Meteobedingungen umgerechneter Heizwärmeverbrauch zu bestimmen. Der witterungsunabhängige Bandlastverbrauch für die Warmwassererwärmung ist dabei via die messtechnische Erfassung der Warmwassermenge ab Mai 2014 abgeschätzt.

Heizölverbrauch Heizung gesamt Epinettes, Marly

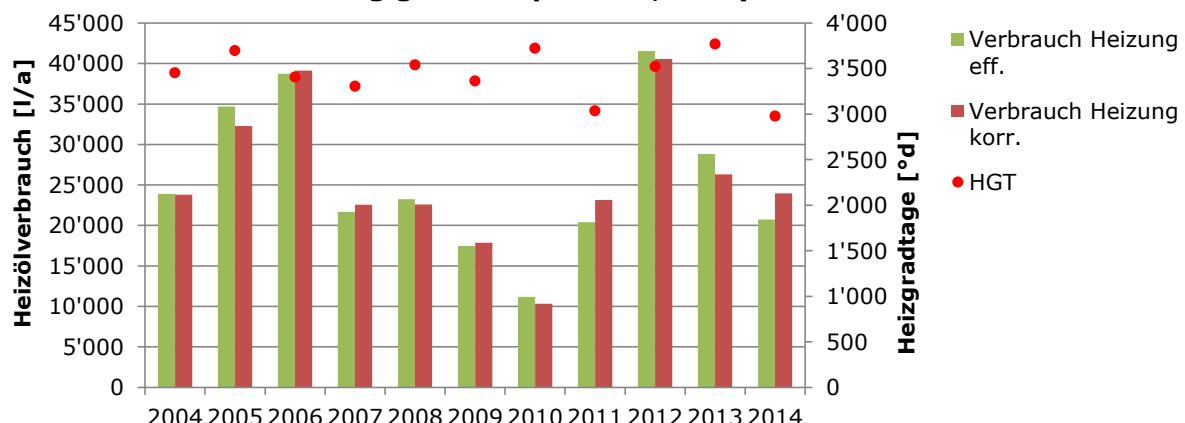


Abbildung 9: Zusammenstellung der Heizöljahresverbrauchsdaten für den Heizwärmeverbrauch aller drei Gebäude: Bis und mit 2012 aus Angaben der Verwaltung, ab 2013 auf Basis der Tankfüllstandsmessung.

Die Variabilität der Verbrauchsdaten lassen auf eine hohe Unsicherheit bei der früheren Erfassung auf Basis von Heizöllieferungen und Tankfüllstandsmessungen schliessen. Als aussagekräftig können lediglich die Ergebnisse der Jahre 2013 und 2014 bezeichnet werden.

Abgestützt auf die permanente Tankfüllstandsmessung kann ein auf Normklima umgerechneter Heizwärmeverbrauch (Stufe Endenergie) von gut 25'000 Liter pro Jahr ermittelt werden (vgl. Abbildung 9). Mit einem angenommenen Wärmeerzeuger-Nutzungsgrad von 0.79³ und zusätzlichen 5% Wärmeverteilerverlusten kann man einen entsprechenden Heizwärmeverbrauch Qh (Stufe Nutzenergie) von 185 MWh/a abschätzen.

2.4.2. Gebäudeenergieausweis GEAK

Der Gebäudeenergieausweis liefert den Norm-Heizwärmebedarf unter Standardbedingungen sowohl bezüglich Nutzung wie Klimabedingungen. Die Energiekennzahl Qh wird darin mit 46 kWh/(m²*a) ausgewiesen (vgl. Abschnitt 2.1). Multipliziert mit der gesamten Energiebezugsfläche aller drei Gebäude zusammen von 4'206 m² ergibt das Qh (Stufe Nutzenergie) von 193.5 MWh/a.

Es zeigt sich ein leichter Minderverbrauch des via Heizölverbrauch ermittelten Wertes gegenüber dem berechneten Bedarfswert des GEAKs von etwa 4%. Diese Übereinstimmung kann als sehr genau bezeichnet werden. Das kann dahingehend interpretiert werden, dass Gebäudehülle und Haustechnik im Grossen und Ganzen den Projektdaten entsprechen und der Betrieb keine offensichtlichen energetischen Mängel oder Anomalien aufweist.

³ Bezogen auf Ho

3. Projektbeschrieb

In diesem Kapitel ist das eigentliche Projekt in dessen Aufbau und Funktionsweise erläutert.

3.1. Zeitlicher Ablauf

Im Rahmen des P&D-Projekts wurden bisher folgende Meilensteine erreicht:

- Oktober 2013: Erarbeitung Korrekturalgorithmus regelbasiert
- November 2013: Etablierung Protokollschnittstelle Pronoó-Server zu triologis-Plattform zur Übermittlung der Raumtemperatursollwertkorrektur
- Weihnacht 2013: Beginn Übermittlung der Sollwertkorrekturen für die Raumtemperaturregelung
- Mitte Januar 2014: Anpassungen im Algorithmus zur Berechnung der Sollwertkorrekturen
- Anfang Februar 2014:
 - Abgleich der Regelparameter der Hydraulikgruppen aller drei Gebäude
 - Inbetriebnahme Wärmezähler Aquametro
- Mitte März 2014: erste Zwischenauswertung auf Basis der Wärmezählerlogdaten
- 20.03.2014: Inbetriebnahme EcoGateway der ersten Generation für die Modulierung der VL-Temperatur in Gebäude 51 und 53 (passiver Betriebsmodus)
- 03.04.2014: Inbetriebnahme des aktiven Betriebs EcoGateway (erste Generation)
- Anfang Mai 2014: Aufschaltung Durchflussmessgeber zur Erfassung des Warmwasserbrauchs pro Gebäude
- Mitte Mai 2014: Vorläufiges Ende der Datenauswertungen für die Redaktion des Zwischenberichtes
- Anfang Juni 2014: Redaktion Zwischenbericht
- Sommer / Herbst 2014: Entwicklung EcoGateway der zweiten Generation
- 07.01.2015: Inbetriebnahme des aktiven Betriebs EcoGateway der zweiten Generation (Geb. 51 und 53)
- April 2015: Erfolgskontrolle, Datenauswertung und Berichtredaktion

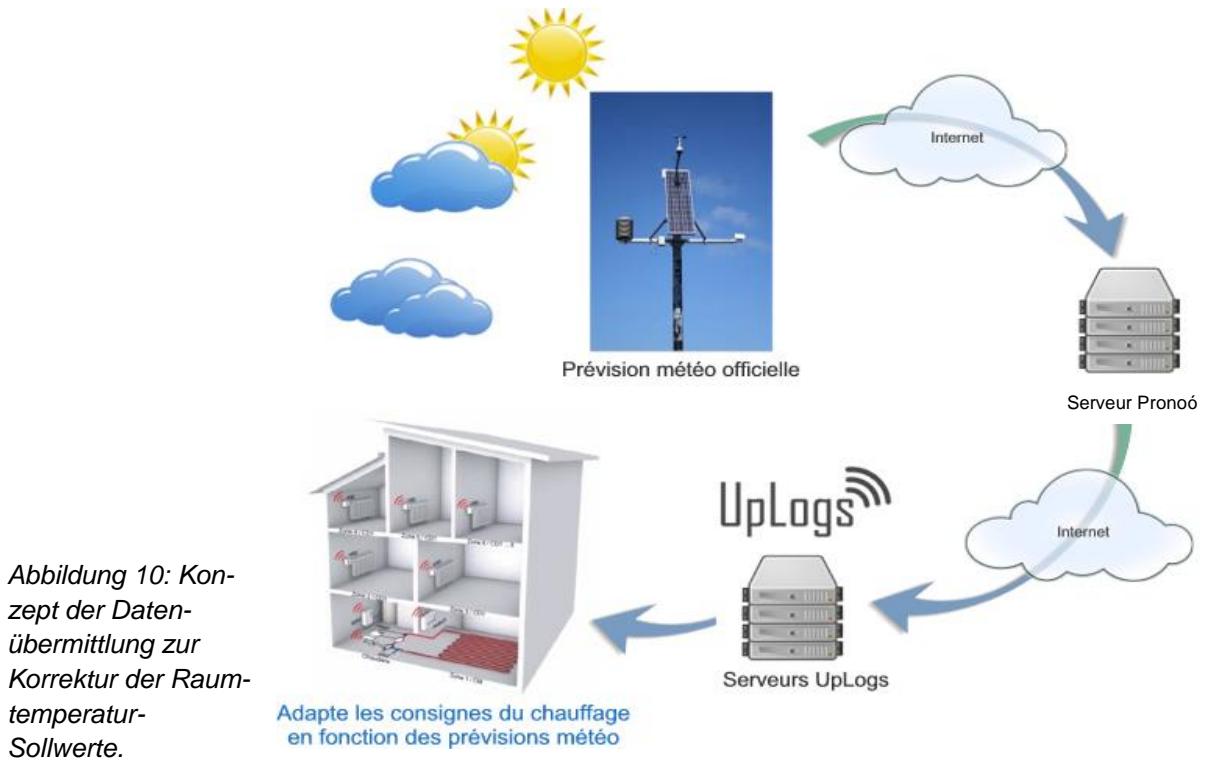
3.2. Technisches Konzept

Die technische Umsetzung des Konzeptes zur Prädiktiven Regeloptimierung teilt sich in zwei Ebenen auf:

- Korrektur der Raumtemperatursollwerte der Einzelraumregulierung
- Korrektur der Sollwerte der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregulierung

3.2.1. Einzelraumregulierung

Die bereits seit 2011 vorhandene Lösung der Einzelraumregulierung UpLogs von Trilogis umfasst bereits die Anbindung des motorischen Heizkörperventils jedes einzelnen Raumes ans Internet. Die technische Umsetzung der vorausschauenden Sollwertkorrektur konnte daher mittels einer Protokollschnittstelle gelöst werden.



Während der Webservice von Pronoo GmbH die Wetterprognosenedaten liest und in deren Funktion einer stündlich aktualisierten Sollwertkorrektur pro Raum berechnet, holt der UpLogs-Server diese Daten ab und addiert sie zum Sollwert, welcher der Bewohner an seinem Ventil eingestellt hat. Es handelt sich beim Korrekturwert also um eine Steuerung und nicht um eine Regelung, da diese ohne Rückmeldung der Regelgröße auskommt. Eine Regelung im herkömmlichen Sinn ist hingegen die Installation vor Ort pro Raum, welche mit einem Raumfühler (Sensor) und dem motorischen Heizkörperventil (Aktor) eine PID-Regelung für die Raumtemperatur bildet.



Abbildung 11: Hardwarekomponenten der Einzelraumregelung von Honeywell: Aktor am Heizkörperventil (links) und Sensor in der Raummitte an der Wand (rechts).

3.2.2. Vorlauftemperaturregulierung

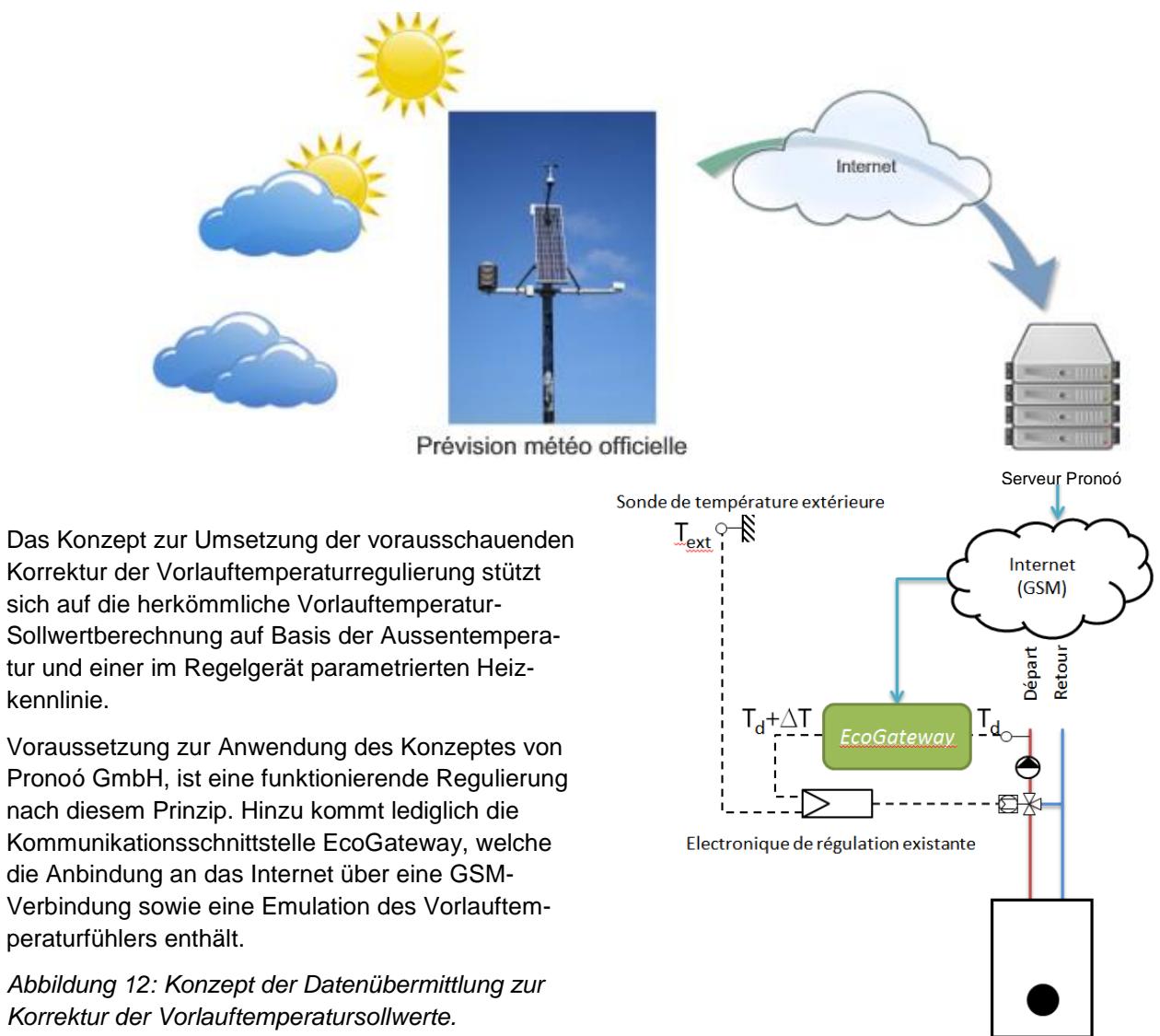


Abbildung 13: Hardwarekomponenten zur Korrektur des Vorlauftemperatursollwertes: Bestehender Siemens-Kompaktregler RVP 210 (links); EcoGateway (2. Generation) von Pronoo GmbH (mitte); bestehende Hydraulikgruppe mit Vorlauftemperaturfühler [Sensor] und Mischventilantrieb [Aktor] (rechts)

3.2.3. Wetterprognosedaten

Die Wetterprognosedaten beziehen wir von der Firma Meteotest in Bern. Meteotest stellt die Daten auf einer geschützten Internetseite zur Verfügung, welche stündlich vom Pronoó-Server (EcoControl) konsultiert werden.

The screenshot shows a web-based interface titled "Solarforecast". At the top right, there are buttons for "JSON", "JSON (Arrays)", "XML", "YAML", "CSV", and "PHP". Below the title, the number "2407" is displayed. A table follows, with columns labeled "dh", "dni", "ff", "gh", "rh", "rr", and "tt". The table contains six rows of data corresponding to the hours from 09:00 to 14:00 on April 29, 2015. The data values are as follows:

	dh	dni	ff	gh	rh	rr	tt
2015-04-29 09:00:00	281	299	4	475	71	0	7.4
2015-04-29 10:00:00	336	318	5	576	65	0	9
2015-04-29 11:00:00	367	328	6	636	59	0	10.5
2015-04-29 12:00:00	353	399	6	689	54	0	11.9
2015-04-29 13:00:00	374	297	7	617	52	0	12.6
2015-04-29 14:00:00	371	198	8	520	49	0	13.4

Abbildung 14: Ausschnitt aus der Darstellung der Wetterprognosedaten auf dem FTP-Server von Meteotest (Zeitangabe in UTC).

Folgende Parameter werden stündlich für das Intervall der nächsten 72 Stunden (3 Tage) aufdatiert nachgeführt:

- dh: Diffusstrahlung horizontal in W/m²
- dni: Direkt-Normalstrahlung in W/m²
- ff: Windgeschwindigkeit in km/h
- gh: Globalstrahlung horizontal in W/m²
- rh: Relative Feuchte in %
- rr: Niederschlag in mm
- tt: Temperatur in °C

Die Daten gelten für die bei der Abfrage definierten geographischen Koordinaten.

Es versteht sich von selbst, dass die jüngsten Werte (zuoberst an der Tabelle) statistisch die geringste Fehlerrate aufweisen. Für laufende Auswertungen nebst der Berechnung von Sollwertkorrekturwerten, wie z.B. die Generierung von Energiesignaturen, verwendet der Algorithmus daher den Wert der „1 Stunden-Prognose“ als approximierter Realwetterwert. Falls bei einer konkreten Anwendung eine Wetterstation vor Ort ist, können selbstverständlich für solche Zwecke auch die Daten derselben verwendet werden.

3.2.4. Erfahrungsbasierte Berechnung der Sollwertkorrekturen

Im Rahmen der Evaluation der geeigneten Methodik zur Berechnung der Sollwertkorrekturwerte, wurde das Konzept des Erlernens des thermischen Verhaltens des Gebäudes unter Einsatz von Softwarekomponenten mit neuronalen Netzwerken studiert (Mustererkennung). Dabei hat sich gezeigt, dass zwar effektive Raumtemperatur- sowie reale Meteodaten vorhanden sind, jedoch zwei relevante Rahmenbedingungen fehlen: Positionen (%) der Heizkörperventile und das Benutzerverhalten (Anwesenheit, Fensterstellungen). Damit fehlt zur Erkennung signifikanter Muster ein Teil der erforderlichen Daten und der Ansatz wurde für das vorliegende Objekt verworfen.

Für andere Gebäudenutzungen und -Typen mit planmässigem Benutzerverhalten und vollständigem Betriebsdatenmonitoring wie z.B. ein Schulgebäude mit einer MSR-Anlage erachten wir indessen dieser Ansatz nach wie vor als interessante Option.

3.2.5. Deterministische Berechnung der Sollwertkorrekturen

Hinter der Berechnung der eigentlichen Sollwertkorrekturen verbirgt sich die Kernkompetenz von Proño GmbH. Im Rahmen dieses öffentlich zugänglichen Berichts werden daher nicht alle Details dazu offengelegt. Zusammenfassend ist das Prinzip nachstehend erläutert. Für das Projekt Epinettes 51 ist dabei zwischen der Anwendung auf der Ebene der Sekundärregelung (Einzelraumregelung) und der Ebene der Primärregelung (Hydraulik-Mischgruppe) zu unterscheiden.

Sollwertkorrektur für Einzelraumregelung:

Die auf den Aktor (beim Projekt Epinettes ist dies das System von Trilogis) angewendete Sollwertkorrektur setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, welche addiert werden:

- Sollwertkorrektur in Funktion der Aussentemperaturänderung
- Sollwertkorrektur in Funktion der Sonneneinstrahlung

Um die geometrische Lage der betreffenden Zone mit der Raumtemperaturregelung innerhalb dem Gebäude zu berücksichtigen, werden zusätzliche Parameter pro Raum⁴ verwendet, um die Sollwertkorrektur im Stundenintervall zu modulieren:

- Vergleich zwischen der maximal zu erwartenden Sonneneinstrahlung (Meteodata unter ClearSky-Bedingungen) und des Prognosewertes.
- Vergleich des maximal möglichen solaren Wärmegewinnes mit dem aktuellen Heizwärmebedarf des Raumes in Funktion der aktuellen Aussentemperatur.

Für eine Adaptation an die realen raumbezogenen Betriebsdaten sollen beide Komponenten mit einem Faktor zwischen 0 und 1 gewichtet werden können. Diese Funktion ist noch nicht spezifiziert, daher ist dieser Wert permanent auf 1 eingesetzt.

Sollwertkorrektur für Vorlauftemperaturregelung:

Auch hier setzt sich die Sollwertkorrektur aus den zwei Komponenten, Aussentemperaturänderung und Sonneneinstrahlung zusammen.

Signalverarbeitung in Funktion der Aussentemperaturentwicklung:

Analog Erklärung im Abschnitt zur Einzelraumregelung (mit anderen Parametern)

Signalverarbeitung in Funktion der Sonneneinstrahlung:

Im Unterschied zur raumweisen Betrachtung spielt hier die Orientierung keine Rolle und es ist daher nicht notwendig, den erwarteten Zeitpunkt des Auftretens pro Raum zu kennen. Zur Beurteilung, wie „sonnig“ die kommenden Stunden des Tages anhand der Strahlungsprognose werden, berechnet der Algorithmus über eine definierte Anzahl Stunden die gleitende Summe der erwarteten Einstrahlung. Diese Summe liefert das Mass für die Berechnung der Sollwertkorrektur.

Die nachfolgende Darstellung erläutert das Prinzip graphisch.

⁴ Stundenwerte aus dynamischer Gebäudesimulation mit Clear Sky-Meteodata

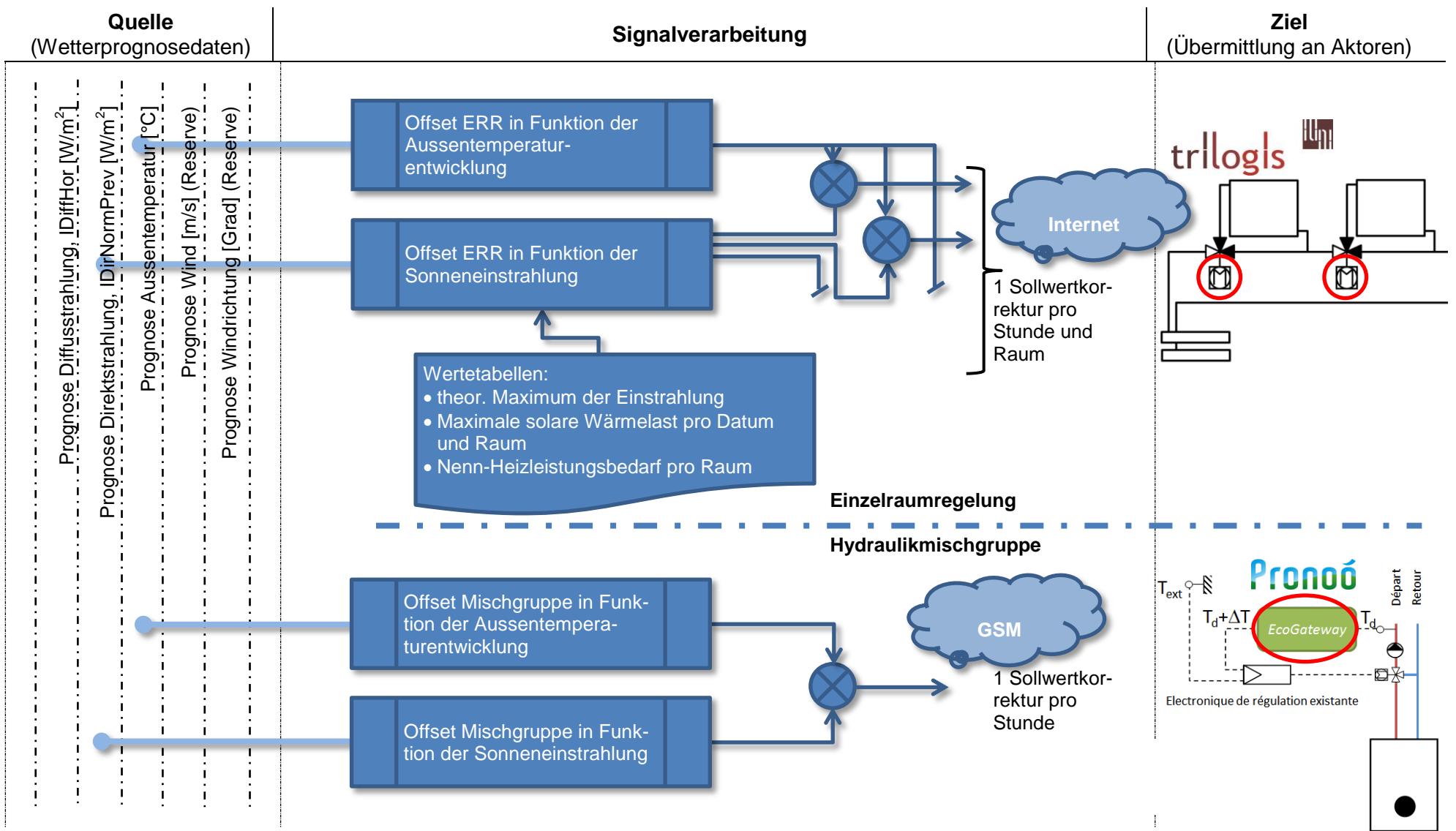


Abbildung 15: Darstellung des Prinzips der deterministischen Berechnung der Sollwertkorrekturen.

4. Erfolgskontrolle

4.1. Konzept

Mit einer systematischen Erfolgskontrolle soll gezeigt werden, ob das angewendete Konzept und die technische Umsetzung im realen Betrieb der Gebäude funktioniert, wie hoch das Effizienzpotential liegt und welchen Einfluss auf die Raumtemperaturen zu verzeichnen ist. Dazu werden zwei Ansätze verfolgt:

4.1.1. Vergleichende Messungen

Der Umstand, dass drei identische Gebäude am Projekt beteiligt sind, wird wie folgt genutzt:

Gebäude	55	53	51
Angewandtes Optimierungskonzept			
Korrektur der Raumtemperatursollwerte der Einzelraumregulierung	nein	nein	ja
Korrektur der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung	nein	ja	ja

Tabelle 1: Die Aufteilung der angewandten Korrekturkonzepte, um eine Erfolgskontrolle mittels Vergleich zwischen den drei Gebäuden zu ermöglichen.

Die vergleichende Analyse stützt sich auf Messergebnisse unter realen Betriebsbedingungen. Gemessen wird der Heizwärmeverbrauch pro Gebäude. Damit beinhalten vergleichende Darstellungen zwischen den Gebäuden einen gewissen Fehler aufgrund des niemals identischen Benutzerverhaltens in allen drei Gebäuden. Die andere Möglichkeit besteht im Vergleich zwischen zwei Zeitintervallen einmal mit und einmal ohne Sollwertkorrektur bei ein und demselben Gebäude. Unter der Voraussetzung, dass während beiden Intervallen an den Reglereinstellungen nichts verändert worden ist, lässt sich der Effekt mittels der Energiesignaturen der beiden Intervalle zeigen.

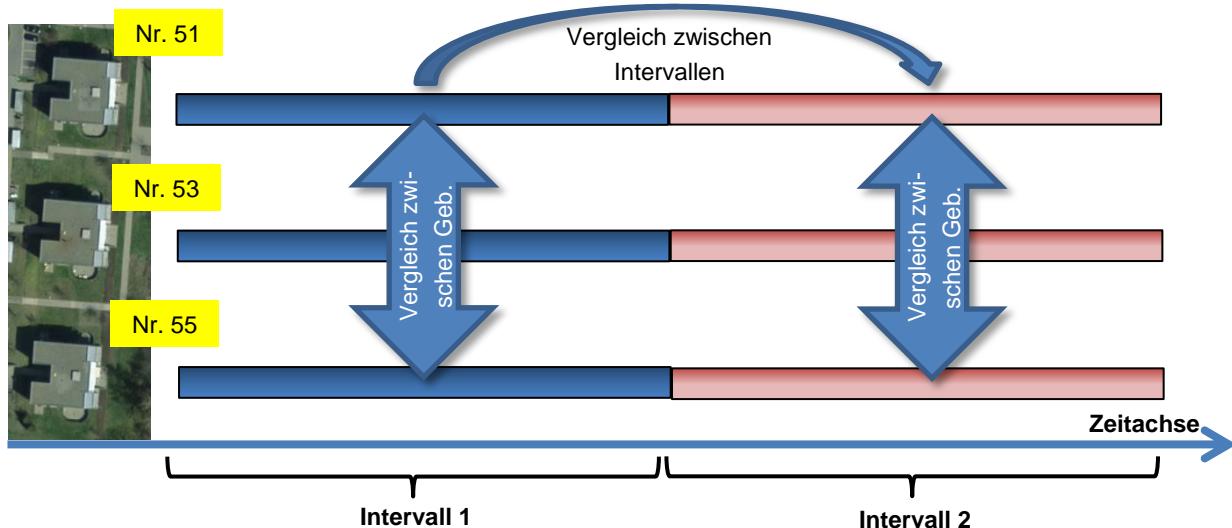


Abbildung 16: Auswertungsmöglichkeiten der Messresultate aus dem realen Gebäudebetrieb.

Die drei Gebäude verfügen je über eine individuelle Mischgruppe mit einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung nach dem Standardschema der Einspritzschaltung.

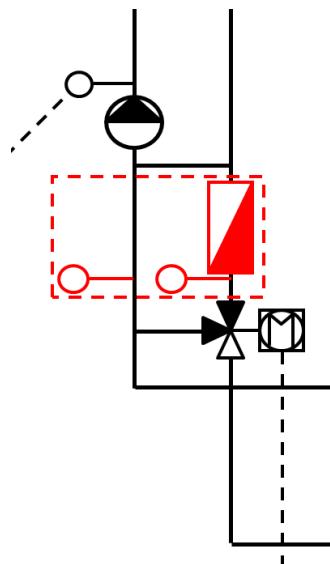


Abbildung 17 (rechts): Hydraulisches Prinzipschema der bestehenden Vorlauftemperaturregelung (schwarz) und der für das Projekt eingebauten Wärmemengenmessung⁵ (rot).



Nr. 51

Nr. 53

Nr. 55

Abbildung 18: Anlage vom Projektpartner Aquametro zur Erfassung der Heizwärmeverbrauchs pro Gebäude: Wärmezähler (Calec energy master, rote Markierung) und Datenlogger (AMBUS-Net, blaue Markierung), welcher über eine Busverbindung mit den Wärmezählern verbunden ist.

4.1.2. Gebäudesimulationsmodell

Im Unterschied zu Messungen unter realen Betriebsbedingungen, lassen sich mit Hilfe von Gebäudesimulationsmodellen thermische Vorgänge unter exakt identischen Rahmenbedingungen (Wetter, Nutzung) aber mit verschiedenen Konfigurationen beliebig wiederholen. Zum detaillierten Studium des Gebäudeverhaltens und des Effekts der Anwendung der Sollwert-Korrekturen steht ein vollständiges Simulationsmodell⁶ zur Verfügung.

Versuche mit dem Simulationsmodell wurden schon im Vorfeld des P&D-Projektes durchgeführt. Die Ergebnisse haben uns schliesslich ermutigt, das Projekt unter realen Bedingungen umzusetzen. In dieser vorgelegerten Phase wurde das Gebäudemodell allerdings nur unter standardisierten Bedingungen betrieben. Das heisst mit Standard-Meteodata⁷ nach SIA 2028 und einer Vorlauftemperaturregelung aus einer gewählten Heizkennlinie, damit der simulierte Verbrauch in etwa dem effektiven entspricht. Zudem stützten sich die berechneten Sollwertkorrekturen auf eine 100% richtige „Wetterprognose“ ab, indem einfach eine zeitversetzte Reihe der Standard-Meteodata als Prognose deklariert worden ist.

⁵ s. komplettes Prinzipschema in Anhang A

⁶ IDA-ICE Version 4.6.1, Expert-Edition, Schweizer Lokalisierung

⁷ DRY - Design Reference Year, Station Bern-Zollikofen

Betriebsart Simulationsmodell	Standardbedingungen	Gemessene Bedingungen
Parameter		
Meteodaten	DRY-Daten, Bern-Zollikofen	Realmeteodaten Marly (Metoschweiz, Meteotest)
Vorlauftemperatur	Charakteristik des Siemens-Regler, eingestellte Heizkennlinie und DRY-Daten	Charakteristik des Siemens-Regler, eingestellte Heizkennlinie und Aussentemperatur-Logdaten an Nordfassade
Sollwertkorrekturen Raumtemperatur	Berechnet auf DRY-Daten	Logdaten UpLogs-Server
Sollwertkorrekturen Vorlauftemperaturregelung	Berechnet auf DRY-Daten	Logdaten Pronoó-Server

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Rahmenbedingungen zur Erläuterung der unterschiedlichen Betriebsweisen des Gebäudesimulationsmodells.

Nach Umsetzung des Projekts im realen Gebäude stehen nunmehr gemessene Parameter zur Verfügung, welche anstelle der vorher genannten Standard-Daten treten. Damit lässt sich das Simulationsmodell der Realität annähern und Validieren.

Der Betrieb des Simulationsmodells unter den gemessenen Bedingungen liefert entscheidende Vorteile:

- Zum einen sind dies:
 - Differenzen zwischen den Gebäuden (z.B. aufgrund der Nutzer) gibt es nicht mehr
 - Das Kriterium Raumklimakomfort kann quantifiziert werden
- Und zum anderen werden gegenüber dem Modellbetrieb unter Standardbedingungen die Ungenauigkeiten der Wetterprognose nunmehr mitberücksichtigt.

4.2. Ergebnisse aus den realen Betriebsdaten

4.2.1. Heizwärmeverbrauchsmessung im Vergleich zwischen den Gebäuden

Um zu überprüfen, ob sich erkennbare Heizwärmeverbrauchsunterschiede zwischen den drei Gebäuden ergaben, können die gemessenen Wärmemengen pro Gebäude z.B. im Wochenintervall summiert und einander gegenüber gestellt werden.

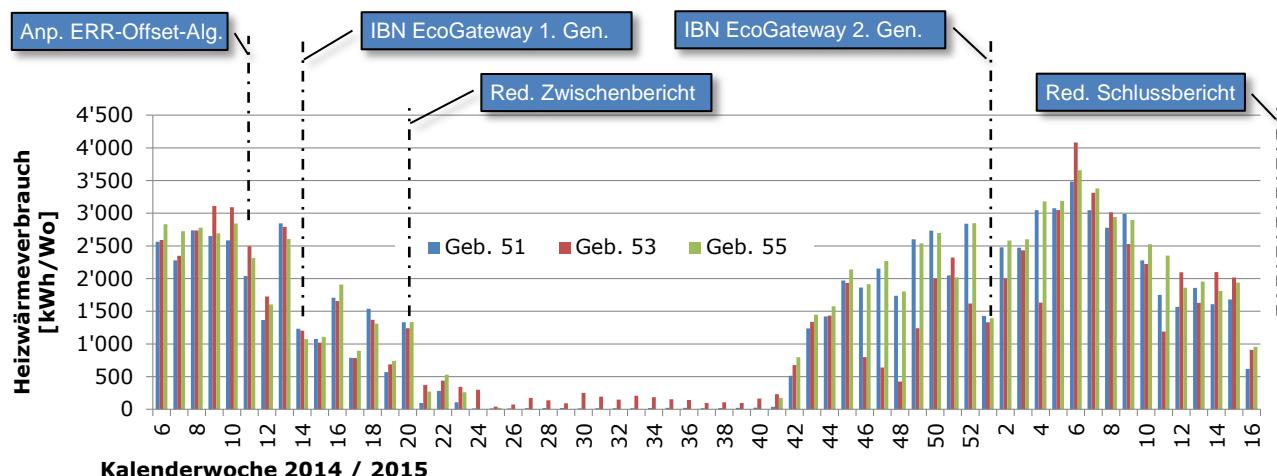


Abbildung 19: Gegenüberstellung der Heizwärmeverbräuche ab Inbetriebnahme der Wärmezähler und Abgleich der Vorlauftemperaturregelungen Anfang Februar 2014 (Kalenderwoche 6) bis Mitte April 2015 (Kalenderwoche 16) mit der Angabe der verschiedenen Betriebskonstellationen.

Erkenntnisse:

- Die Unterschiede zwischen den Gebäuden bewegen sich im Bereich von wenigen bis geschätzten 10%. D.h. dass die Verbrauchssituationen insgesamt sehr gut untereinander vergleichbar sind.
- Die Abweichungen sind nicht repetitiv, d.h. sie bewegen sich innerhalb der Streubreite der Ungenauigkeiten des Gesamtsystems, welches u. A. vom Nutzerverhalten abhängig ist.
- Eine Änderung ab Inbetriebnahme der Sollwertkorrektur auf der Vorlauftemperatur durch den EcoGateway der 1. Generation am 03.04.2014 (Mitte Kalenderwoche 14) kann nicht beobachtet werden.
- Die Anomalien beim Gebäude 53 zu Beginn der Heizperiode 2014/15 sind auf ein Problem des Mischventilantriebs zurückzuführen und haben nichts mit dem Pilotprojekt zu tun.
- Eine Differenzierung zwischen den zwei verschiedenen Konzepten zur Anwendung einer Sollwertkorrektur ist nicht möglich (vgl. Tabelle 1 und Abschnitt 3.2).
 - Dies ist auf das Konzept der Einrohrheizung zurückzuführen. (siehe entsprechende Erläuterungen im Abschnitt 4.3)
- Mit der Inbetriebnahme des EcoGateways der 2. Generation kann eine repetitive Differenz im erwarteten Sinn zwischen dem Gebäude 51 und 55 festgestellt werden. Das Verhalten vom Gebäude 53 folgt hingegen keiner Gesetzmäßigkeit. Dies ist auf ein technisches Problem beim EcoGateway in diesem Gebäude zurückzuführen, dessen Ursache nicht geklärt werden konnte. Eigentlich wäre erwartet worden, dass sich die Gebäude 51 und 53 praktisch gleich verhalten, da ja der Einfluss der Modulierung der Raumtemperatursollwerte in Nr. 51 als vernachlässigbar eingestuft werden musste. (vgl. Erläuterungen im Anhang B)
 - Aus diesem Grund wird im Folgenden das Gebäude 53 nicht mehr in die vergleichende Betrachtung einbezogen.

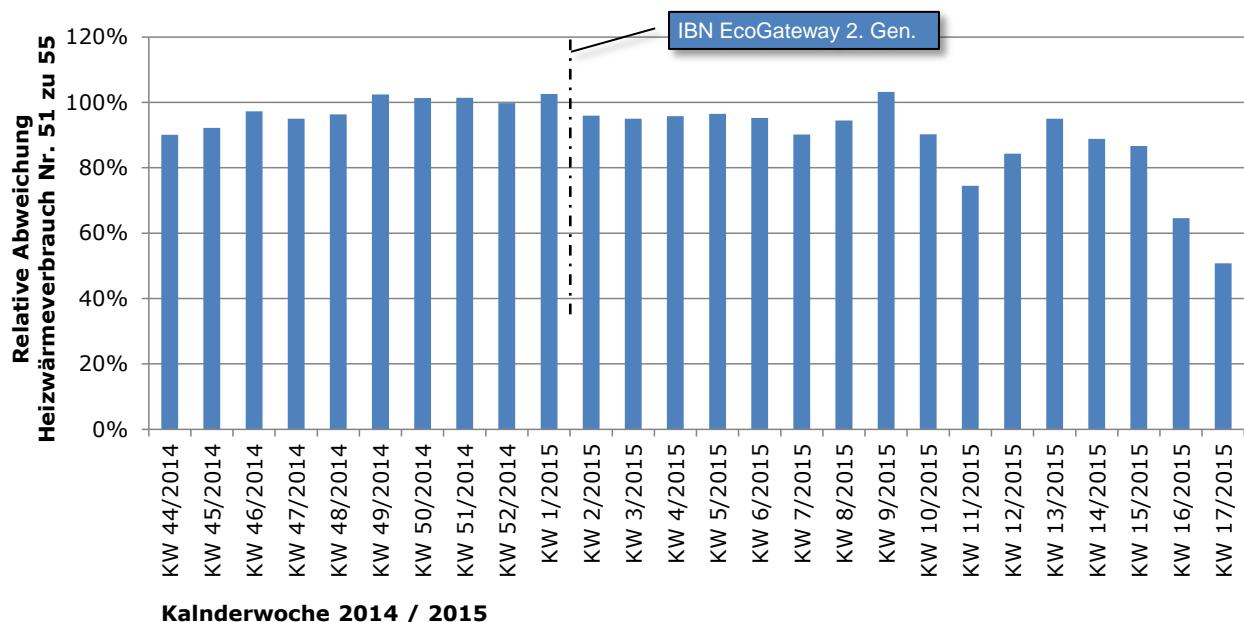


Abbildung 20: Relativer Vergleich zwischen Nr. 51 (mit EcoGateway) und 55 (ohne EcoGateway = 100%): Die Verbrauchsreduktion wird sichtbar und erreicht im März (ab KW 10) 10 – 20% resp Mitte April 30 und mehr Prozent.

Eine weitere Möglichkeit ist die vergleichende Darstellung des kumulierten Heizwärmeverbrauchs über den betrachteten Zeitraum. Dabei lassen sich auf derselben Zeitachse die Witterungsverhältnisse abbilden, was deren Zusammenhang verdeutlicht.

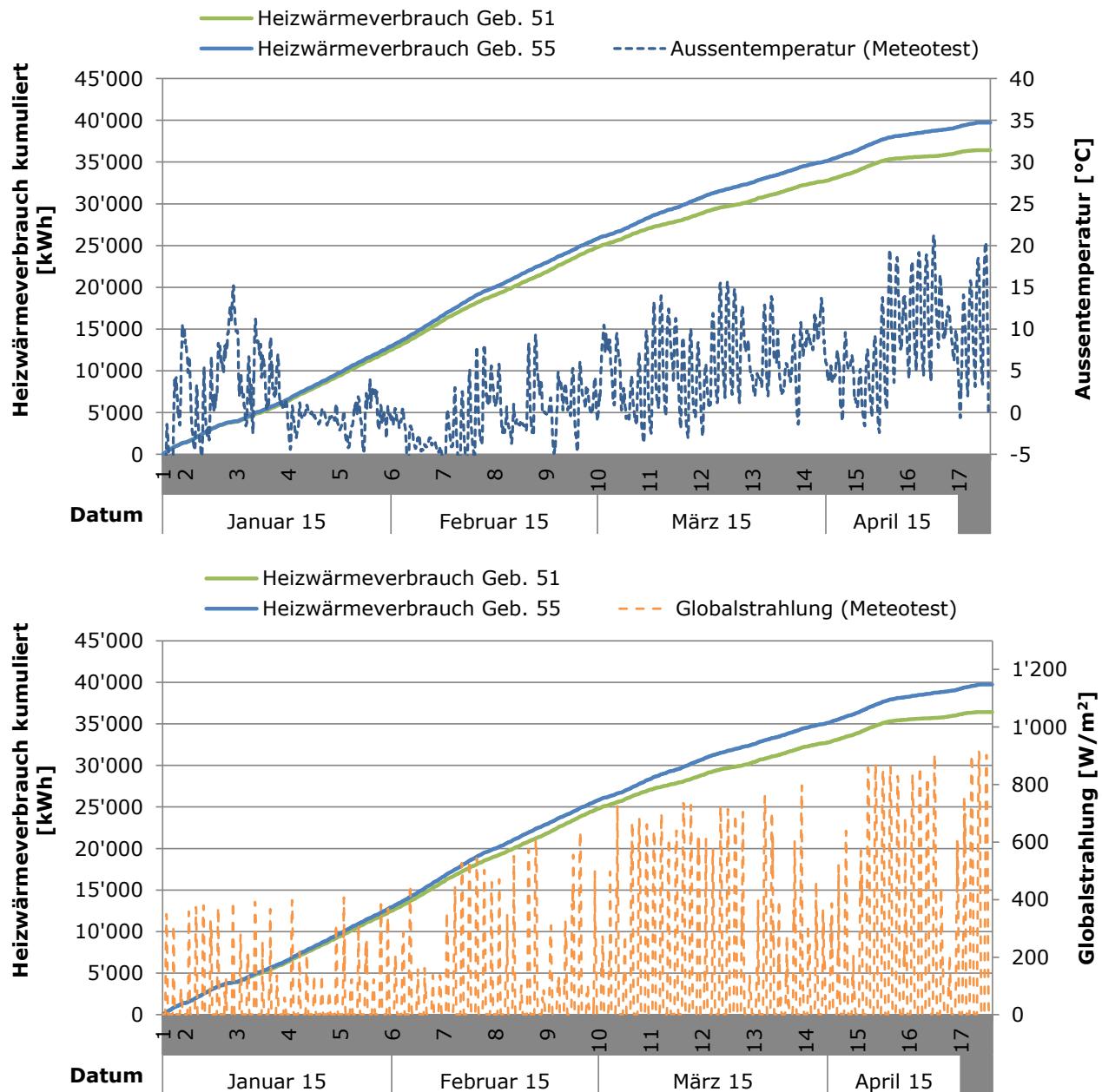


Abbildung 21: Gemessener kumulierter Heizwärmeverbrauch der Gebäude 51 und 55 in Funktion der Zeit seit Beginn des aktiven Betriebs des EcoGateways Anfang Januar 2015 zusammen mit den realen Witterungsdaten von Meteotest: Oben Aussentemperatur, unten Globalstrahlung.

Erkenntnisse:

- Der Heizwärmeverbrauch der beiden Gebäude ist grundsätzlich sehr gut vergleichbar, der kumulierte Verbrauch verläuft annähernd parallel.
- Die erwartete Differenz aufgrund der Anwendung der Sollwertkorrekturen bildet sich ab Februar ab und nimmt progressiv zusammen mit den höheren Einstrahlungswerten und zunehmenden Außentemperaturen zu.

4.2.2. Heizwärmeverbrauchsmessung im Vergleich zwischen Intervallen

Um aus den Wärmemengenmessungen während einer begrenzten Periode auf einen Jahresverbrauchs-wert unter Standardmeteobedingungen zu extrapolieren, bietet sich das bekannte Verfahren der Energie-signatur an. Hierzu wird der gemessene Verbrauch über eine definierte Periode summiert und in Funktion der während dieser Zeit gemittelten Aussentemperatur gestellt. Geeignete Zeitintervalle zur Bildung von Energiesignaturen dauern zwischen 1 Tag und einer Woche. Je mehr Intervalle mit einer möglichst grossen Variabilität der Aussentemperaturen zur Verfügung stehen, desto repräsentativer kann eine Energie-signatur abgebildet werden. Über eine lineare Regression der einzelnen Messpunkte lässt sich danach die Abhängigkeit der Heizlast von der Aussentemperatur als mathematische Formel (lineare Funktion) abbilden. Im vorliegenden Fall wurden die Signaturen auf Basis von Tagesdaten (Aussentemperaturmittelwerte und Heizwärmeverbrauch pro Tag) erstellt.

Die folgenden Energiesignaturen wurden über zwei Intervalle vor und nach der Inbetriebnahme der Sollwertkorrektur erstellt. Diese beiden Intervalle sind so gewählt, dass sich beim Gebäude 55 (ohne EcoGateway) *keine* Differenz zwischen den extrapolierten und normierten Jahresverbrauchswerten (Intervall 1 und 2) ergibt. Damit ist sichergestellt, dass die verglichenen Perioden auch wirklich bzgl. der Variabilität der Aussentemperatur und des witterungsabhängigen Heizwärmeverbrauchs vergleichbar sind.

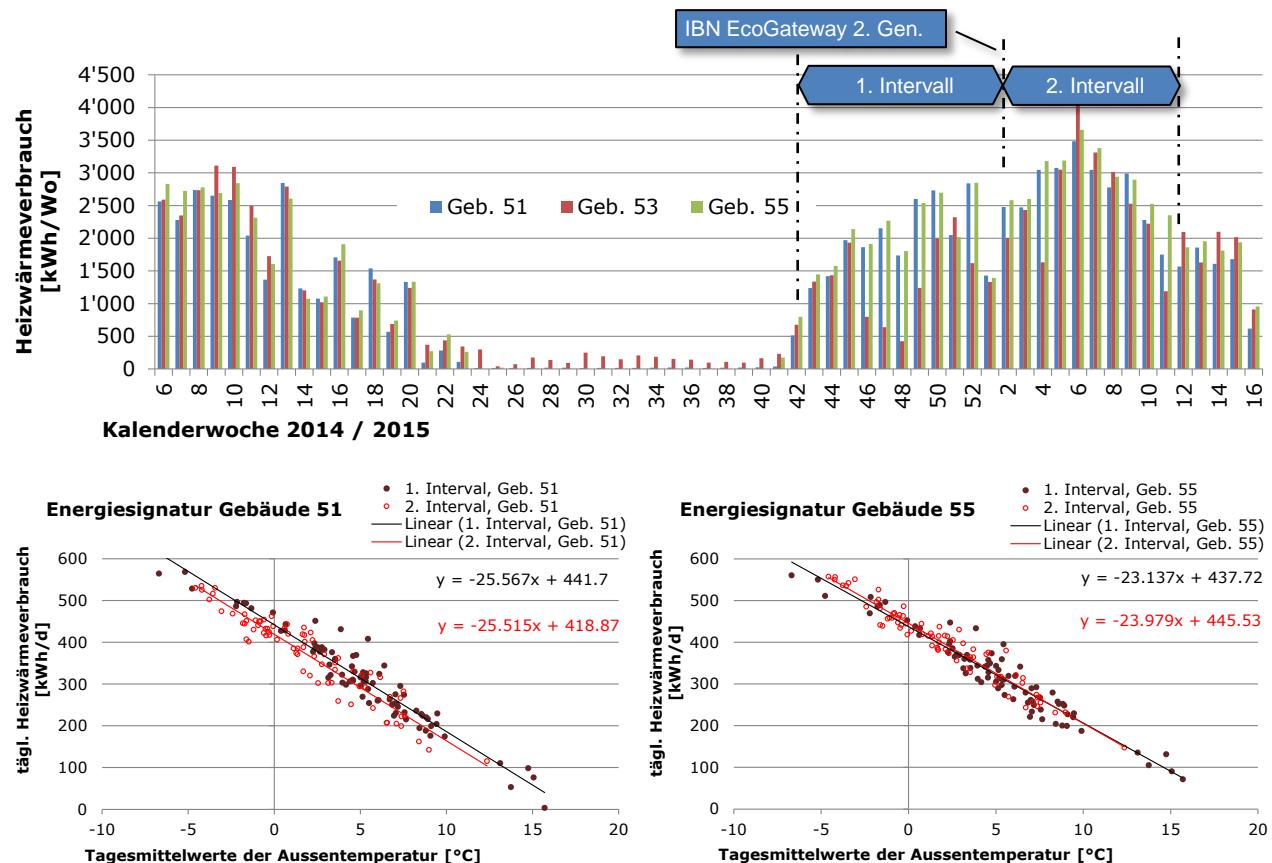


Abbildung 22: Definition der Intervalle (oben) und die resultierenden Energiesignaturen der Geb. 51 und 55.

Anhand der Funktionen der linearen Regression kann über die DRY-Meteodata (Tageswerte) der Heizwärmeverbrauch unter Standart-Klimabedingungen berechnet werden. Damit lässt sich das zu erwartende Effizienzpotential durch die optimierte Vorlauftemperaturregelung analytisch bestimmen.

Parameter	Gebäude	Geb. 51	Geb. 55
Jahresverbrauch aus Intervall 1		74'757 kWh/a	81'558 kWh/a
Jahresverbrauch aus Intervall 2		66'574 kWh/a	81'553 kWh/a
Differenz		10.9 %	0.0 %

Tabelle 3: Extrapolierte Jahresverbrauchsdaten und deren Vergleich mit und ohne Anwendung der Sollwertkorrektur auf die Vorlauftemperaturregelung.

4.2.3. Funktionsanalyse im Detail

Da sämtliche Messdaten in Stundenauflösung vorliegen, lässt sich das Verhalten des Systems im Detail analysieren. Nachstehend ist eine 4-tägige Sequenz dargestellt, welche eine Situation im Januar 2015 darstellt.

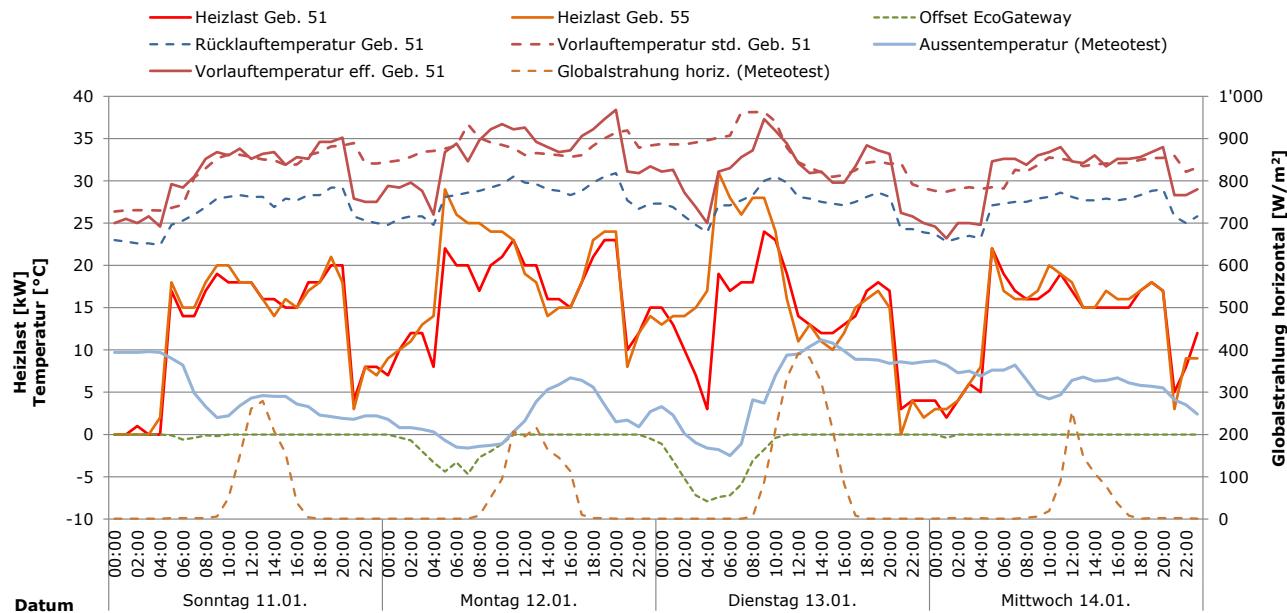


Abbildung 23: Darstellung der Betriebsdaten an 4 Januartagen mit einem markanten Anstieg der Aussen-temperatur von Montag zu Dienstag.

Erläuterungen:

- Wenn der Offset bei 0 liegt (=keine Korrektur), dann liegen die gemessenen Heizlasten der beiden Gebäude erstaunlich nahe beieinander, was die Vertrauenswürdigkeit der vergleichenden Betrachtungen zwischen den Gebäuden erhöht (vgl. Abschnitt 4.2.1).
- Die Logik des Algorithmus zur Berechnung der Sollwertkorrektur (vgl. Abschnitt 3.2.5) lässt sich am Verlauf des angewendeten Wertes („Offset EcoGateway“) bei gleichzeitiger Beobachtung der Aussentemperatur und der Globalstrahlung sehr gut nachvollziehen.
- Als Folge der angewendeten Sollwertkorrektur auf die Regelung beim Gebäude 51, wird die Differenz zum Gebäude 55 (ohne Korrektur) sichtbar. Die Fläche zwischen den beiden Heizlast-Verläufen gibt gleichzeitig die Energieverbrauchseinsparung wieder.
- Der Parameter „Vorlauftemperatur std. Geb. 51“ ist aus der vor Ort gemessenen Aussentemperatur und der Einstellung der witterungsgefährdeten Vorlauftemperaturregelung berechnet. Effektiv gemessen wird nur die im realen Betrieb angewendete Vorlauftemperaturtemperatur („Vorlauftemperatur eff. Geb. 51“). Dabei kann festgestellt werden, dass der durch den bald 20 Jahre alten Siemens-Regler berechnete Vorlauftemperatursollwert sehr genau dem effektiv gemessenen entspricht.

4.2.5. Verhalten der Raumtemperaturen

Nachdem in den vorangehenden Abschnitten der energetische Effekt bzw. das eigentliche Funktionieren des Konzepts gezeigt werden konnte, muss nun die kritische Frage nach den resultierenden Raumtemperaturen gestellt werden. Denn eine Energieeinsparung ist bekanntlich problemlos mit einer reduzierten Raumtemperatur zu erreichen. Als Richtwert gilt dabei, dass der Jahresverbrauch pro permanent reduzierter Grad Raumtemperatur um etwa 6 % verringert wird.

Einmal mehr zeigen sich die Vorteile der vorliegenden Versuchsanordnung, weil auch die Raumtemperaturen im Stundenintervall durch das vorhandene Einzelraumregelungssystem von Trilogis aufgezeichnet werden.

In einem ersten Ansatz wurden z.B. für die im Abschnitt 4.2.2 angewendeten Intervalle die Raumtemperaturen gemittelt, um einen Vergleich zwischen den Intervallen aber auch zwischen den Gebäuden vorzunehmen. Nach wie vor sollen zur besseren Lesbarkeit hier nur die Daten der Gebäude 51 und 55 diskutiert werden, weil der EcoGateway bei Nr. 53 eine Störung verursacht hat.

Parameter	Gebäude	Geb. 51	Geb. 55
Aussentemperaturmittelwert aus Intervall 1 (17.10.2014 – 07.01.2015)		5.0 °C	
Aussentemperaturmittelwert aus Intervall 2 (08.01.2015 – 24.03.2015)		2.0 °C	
Raumtemperaturmittelwert aus Intervall 1	20.7 °C	20.9 °C	
Raumtemperaturmittelwert aus Intervall 2	20.5 °C	20.8 °C	
Differenz Raumtemperaturmittelwerte nach Intervall	0.2 K	0.1 K	

Tabelle 4: Gemittelte Aussen- und Raumtemperaturen pro Gebäude und Intervall: Die Differenzen bei den Raumtemperaturen liegen im Zehntelgrad-Bereich und es kann bei Nr. 51 im 2. Intervall keine signifikante Raumtemperaturabsenkung festgestellt werden.

In einem zweiten Ansatz wurde der Frage nachgegangen, inwiefern die Orientierung und Lage der Räume im Gebäude einen Einfluss auf die Raumtemperatur hat. Um vom Benutzerverhalten abhängige Effekte zu verwischen, wurden dazu die erfassten Räume und Zonen zunächst gruppiert und anschliessend über dieselben Zeitintervalle gemittelt.

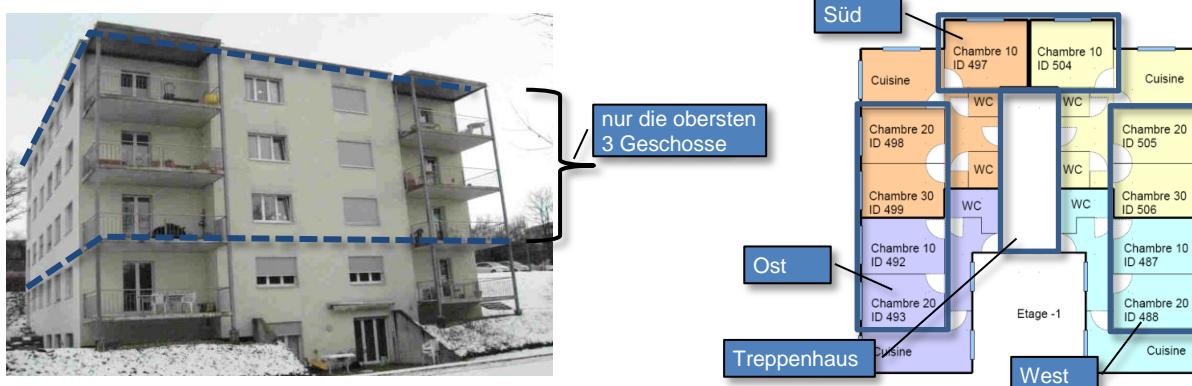


Abbildung 24: Definition der Raumgruppierung zur Temperaturmittelwertbildung

Parameter	Gebäude 51				Gebäude 55			
	Ost	Süd	West	TH	Ost	Süd	West	TH
Raumtemperaturmittelwert aus Interv. 1	20.1 °C	20.5 °C	20.8 °C	22.0 °C	21.1 °C	20.7 °C	20.9 °C	22.3 °C
Raumtemperaturmittelwert aus Interv. 2	20.1 °C	20.0 °C	20.7 °C	21.5 °C	21.0 °C	20.6 °C	20.8 °C	22.3 °C
Differenzen nach Intervall	0.0 K	0.5 K	0.1 K	0.4 K	0.0 K	0.1 K	0.0 K	0.0 K

Tabelle 5: Gemittelte Raumtemperaturen pro Gebäude, Raumgruppe und Intervall.

Bei diesem Vergleich fällt die um ein halbes Grad tiefer liegende Temperatur der südorientierten Räume beim Gebäude 51 auf. Für diese verhältnismässig exponierte Raumgruppe hat die reduzierte Vorlauftemperatur offenbar nun doch eine messbare Raumtemperaturreduktion zur Folge auch wenn diese eigentlich von einer ungestörten Besonnung profitieren kann. Eine Detailbetrachtung der zeitlichen Verläufe lässt eine gewisse Schlussfolgerung zu:

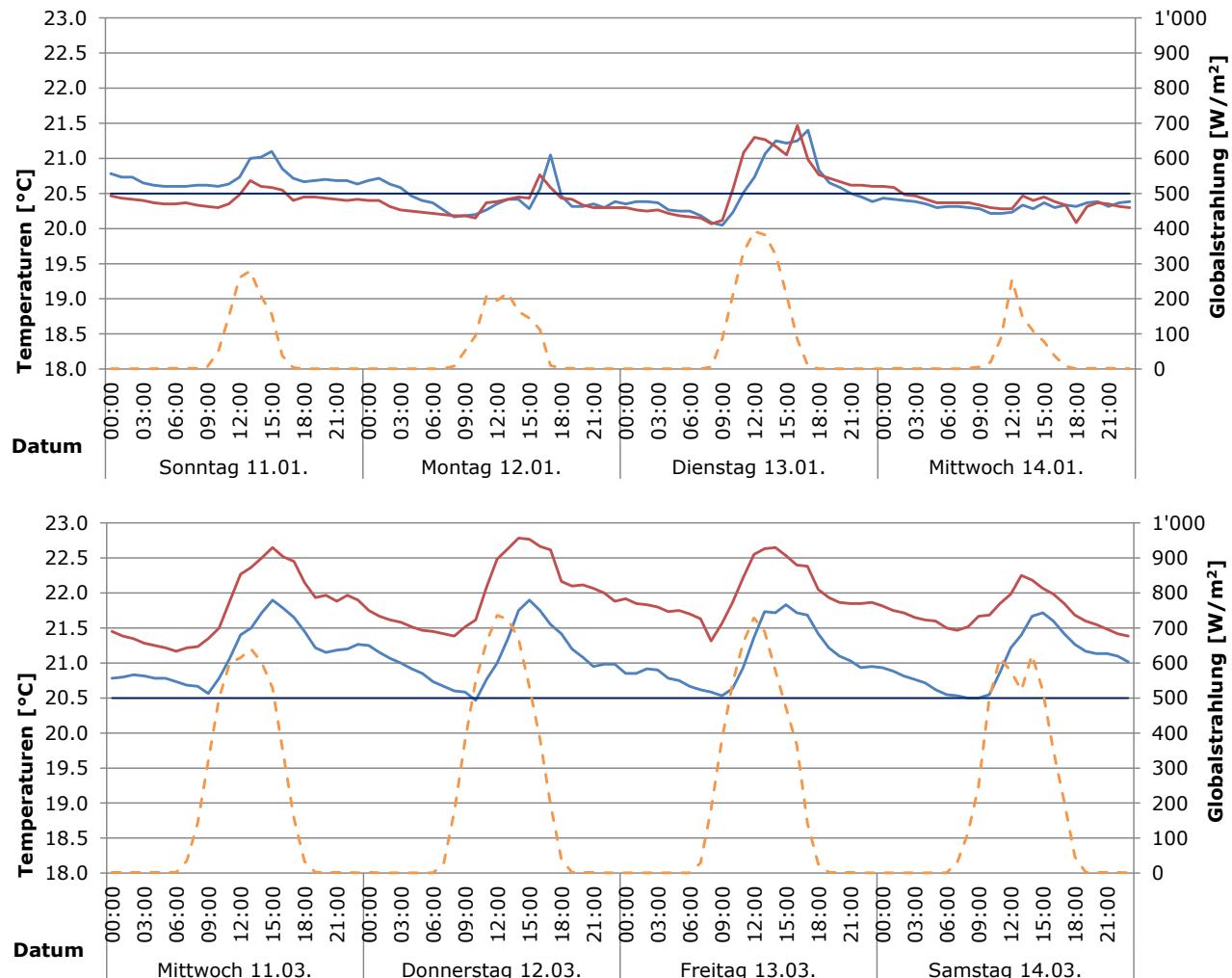


Abbildung 25: Verlauf der für die südorientierten Räume gemittelten Raumtemperaturwerte und die Globalstrahlung für 4 Januartage (oben) und 4 Märztagen (unten). Legende: Blau = Geb. 51, Rot = Geb. 55, Orange gestrichelt = Globalstrahlung, Dunkelblau = untere Komfortgrenze gem. SIA 180 (bei 20.5 °C)

Erkenntnisse:

- Bei winterlichen Verhältnissen und damit bei keiner oder nur geringer Sollwertkorrektur liegen die Raumtemperaturen bei beiden Gebäuden praktisch gleich und teilweise unterhalb der unteren Komfortgrenze.
- An aufeinanderfolgenden schönen Märztagen liegen die Temperaturen im Gebäude 55 ohne Sollwertkorrektur um etwa 1 K über denen im Gebäude 51 und damit aus energietechnischer Sicht etwas zu hoch. Während die Temperaturen beim Gebäude 51 ideal knapp über der unteren Komfortgrenze liegen.
- Die Variabilität zwischen den Minima und Maxima innerhalb eines 24h-Intervalls scheint durch die Anwendung der Sollwertkorrektur weitgehend unbeeinflusst zu sein.

4.3. Ergebnisse aus dem Simulationsmodell

Im Zwischenbericht vom Juli 2014 wurde aufgrund der kaum auswertbaren Heizwärmeverbrauchsmessungen der Fokus auf die Erfolgskontrolle mittels dynamischer Gebäudesimulation gelegt. Es soll an dieser Stelle der Vollständigkeit und der besseren Lesbarkeit halber nur eine Zusammenfassung der damaligen Simulationsresultate wiedergegeben werden, damit diese mit den nunmehr vorliegenden Messdaten verglichen werden können.

Das Simulationsmodell wurde mit den realen Betriebsdaten (Raumtemperaturen und Heizwärmeverbrauch, eingestellte Heizkurven usw.) validiert⁸ und die Resultate konnten sehr gut an die effektiven Betriebsdaten angenähert werden.

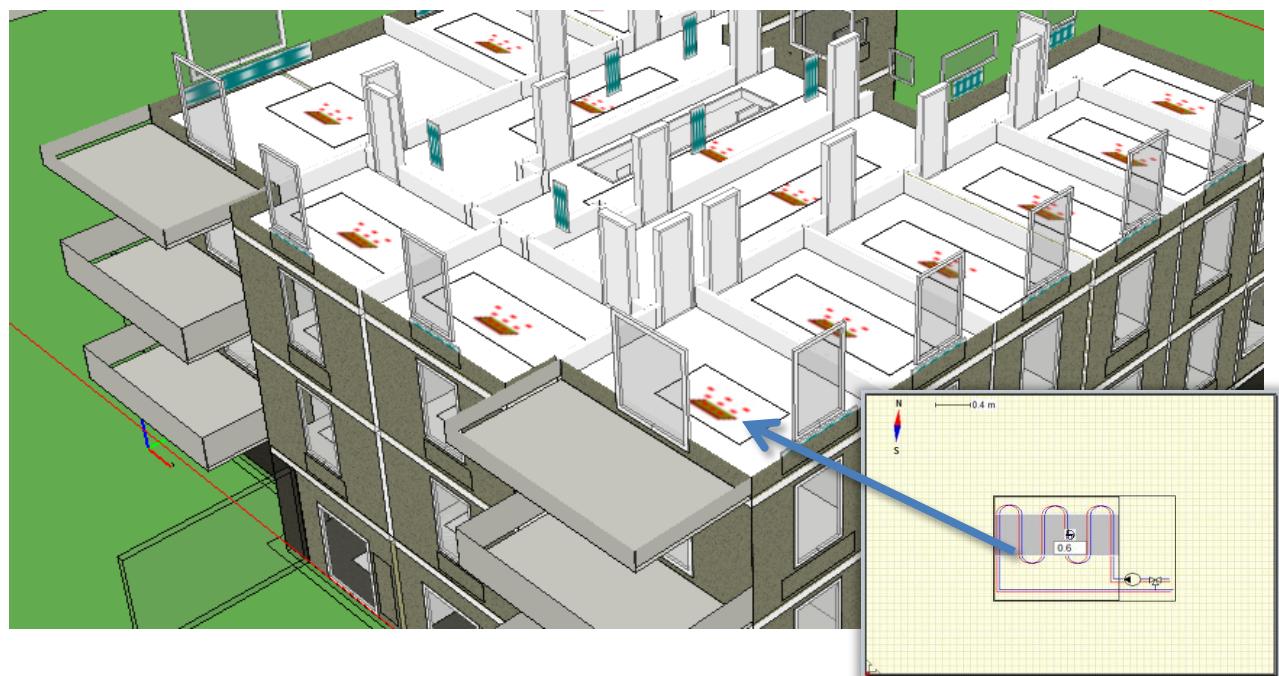


Abbildung 26: 3D-Darstellung des Simulationsmodells mit einer Fußbodenheizungsfläche in jedem Raum, die etwa 20% der Netto-Raumfläche einnimmt, mit einer spezifischen Leistung von 60 W/m^2 im Auslegefall spezifiziert ist und die Wärmeabgabe der Heizkörpererschliessungsleitungen der Einrohrheizung abbildet.

4.3.1. Heizwärmeverbrauch

Mit dem Simulationsmodell lässt sich der Effekt der Sollwertkorrekturen zeigen, weil unter reproduzierbaren Bedingungen einmal die Ausgangslage – ohne Sollwertkorrektur – und dann das Effizienzpotential mit Sollwertkorrektur quantifiziert werden kann.

Der einzige Unterschied zur Realität besteht darin, dass der Algorithmus zur Berechnung der Sollwertkorrekturen nicht Wetterprognosedaten sondern die dem Modell hinterlegten DRY-Meteodaten verwendet. Der Einfluss des Fehlers der Wetterprognose im Vergleich zum effektiven Wettergeschehen fällt deshalb im Modell weg.

⁸ Resultate unter Standard-Meteobedingungen:

- Raumtemperaturen Modell während Heizperiode: ca. 1.0 K über den effektiv beobachteten
- Heizwärmeverbrauch: etwa 6% über dem gemessenen

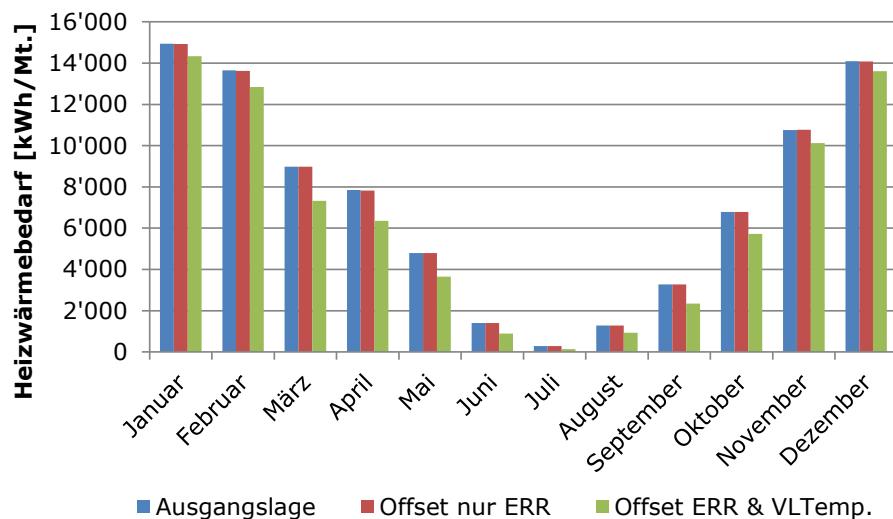


Abbildung 27: Vergleichende Darstellung der monatlichen Heizwärmeverbrauchsdaten für drei unterschiedliche Konfigurationen.

Diese Darstellung zeigt, dass die Modulierung des Raumtempersollwertes im vorliegenden Fall wegen der Einrohrheizung keinen Einfluss hat. In der Folge wird diese Konfiguration auch nicht weiter kommentiert. Die Jahresverbrauchsdaten präsentieren sich wie folgt:

Konfiguration Parameter	Sollwertkorrektur auf Vorlauf- temperatur	Ausgangslage (keine Korrektur)
Heizwärmeverbrauch	73'910 kWh/a	82'870 kWh/a
Differenz	-10.8 %	Referenzwert

Tabelle 6: Ermittlung des Effizienzpotentials aus den Resultaten der Simulation.

Wir schätzen beim vorliegenden Objekt ein Effizienzpotential von 15% – 20%, wenn die Einzelraumregelung wirklich ihre Funktion wahrnehmen könnte (Zweirohrheizung). Denn die beiden Regelkonzepte würden sich entsprechend Ihrer eigentlichen Funktion auch mit der vorausschauenden Optimierung ideal ergänzen.

4.3.2. Raumtemperaturen

IDA-ICE erzeugt eine standardisierte Übersicht der Resultate, mit welcher sich verschiedenen Simulationsmodelle in einer Zusammenfassung vergleichend darstellen lassen.

Komfortreferenz	
	20140601_I
Anteil der Stunden mit einer Operativtemperatur über 27 °C (in wärmster Zone)	5
Anteil der Stunden mit einer Operativtemperatur über 27 °C (in durchschnittlicher Zone)	1
Anteil der Gesamtnutzungsstunden mit thermischen Diskomfort	6
	20140603_I
	4
	1
	6

Abbildung 28: Ausschnitt der Resultate aus dem vergleichenden Übersichtsbericht von IDA-ICE.
Spalte links = Modell ohne Sollwertkorrektur; Spalte rechts = Modell mit Sollwertkorrektur

Erläuterungen:

- Laut den Simulationsresultaten ist dank der optimierten Regelung mit weniger Überhitzten Stunden zu rechnen. Dies betrifft vor allem Situationen in der Übergangszeit.
- Die Differenzen sind aber insgesamt sehr gering, weshalb die Anteile der Stunden mit thermischen Diskomfort über ein ganzes Jahr (in %) unverändert bleibt.
- Diese simulierten Resultate lassen sich mit den in der Zwischenzeit vorliegenden gemessenen Raumtemperaturdaten gem. Tabelle 4 durchaus bestätigen.

Seit Anbeginn der Nutzung der Gebäude zeigte sich immer wieder die unangenehme Überhitzungssituation der Treppenhäuser, welche auf das Installationskonzept der Heizkörperverrohrung zurückzuführen ist. Die Gegenüberstellung der simulierten Temperaturen als Monatsmittelwerte zeigt, dass in den Frühlingsmonaten Temperaturreduktionen von fast 1 K erreicht werden. Der Mittelwert während dem Winterhalbjahr beträgt lediglich gut 0.5K.

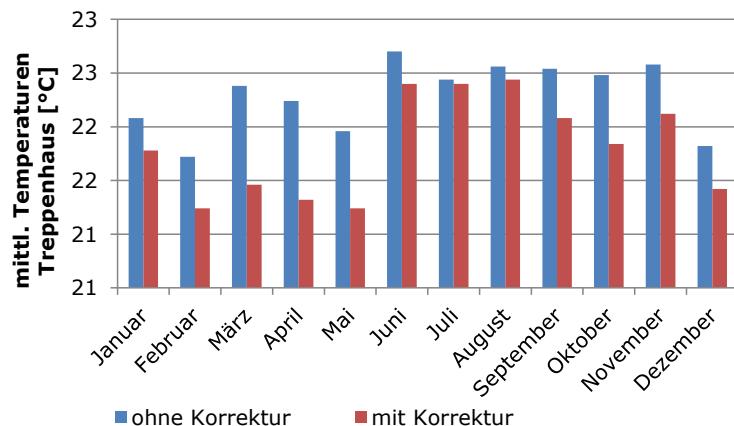


Abbildung 29: Vergleich der Temperaturen im Treppenhaus als Monatsmittelwerte.

Auch diese Simulationsresultate lassen sich zumindest qualitativ mit den gemessenen und gemittelten Temperaturen (s. Tabelle 5) bestätigen.

5. Ausblick

Nach den anfänglichen Schwierigkeiten in der Heizperiode 2013/14 konnte im vergangenen Winter 2014/15 das Projekt doch noch erfolgreich zu Ende geführt werden. Die gute Übereinstimmung der gemessenen Resultate im realen Betrieb mit den Resultaten aus dem Simulationsmodell liefert eine zusätzliche Sicherheit und steigert die Qualität der durchgeführten Erfolgskontrolle.

Wir sind daher zuversichtlich, dass das Konzept als Ganzes in die richtige Richtung weist. Das ermutigt uns, weitere Schritte auf diesem Weg zu unternehmen:

Neue Projekte in Bearbeitung (durch Pronoó GmbH):

- Für die Heizperiode 2015/16 sind insgesamt 20 Gebäude mit dem EcoGateway ausgerüstet. Im Frühling 2016 ist die Auswertung dieses erweiterten Feldtests vorgesehen.
- Projektspezifische Modifikation des deterministischen Algorithmus zur Sollwertkorrektur zu einem Schulhaus in Freiburg auf Basis von Energiebilanzberechnungen mit einem dynamischen Simulationsmodell.
- Ausrüstung einer zweiten Gebäudegruppe von Studentenwohnungen von Apartis im Freiburgischen Givisiez mit denselben Konzepten zur Sollwertkorrektur wie Epinettes. Diese Gebäude verfügen über eine Fußbodenheizung und die Einzelraumregelung wirkt auf die betreffenden Fußbodenheizungsringe. Probleme wie mit der Einrohrheizung bei Epinettes gibt es daher dort nicht.

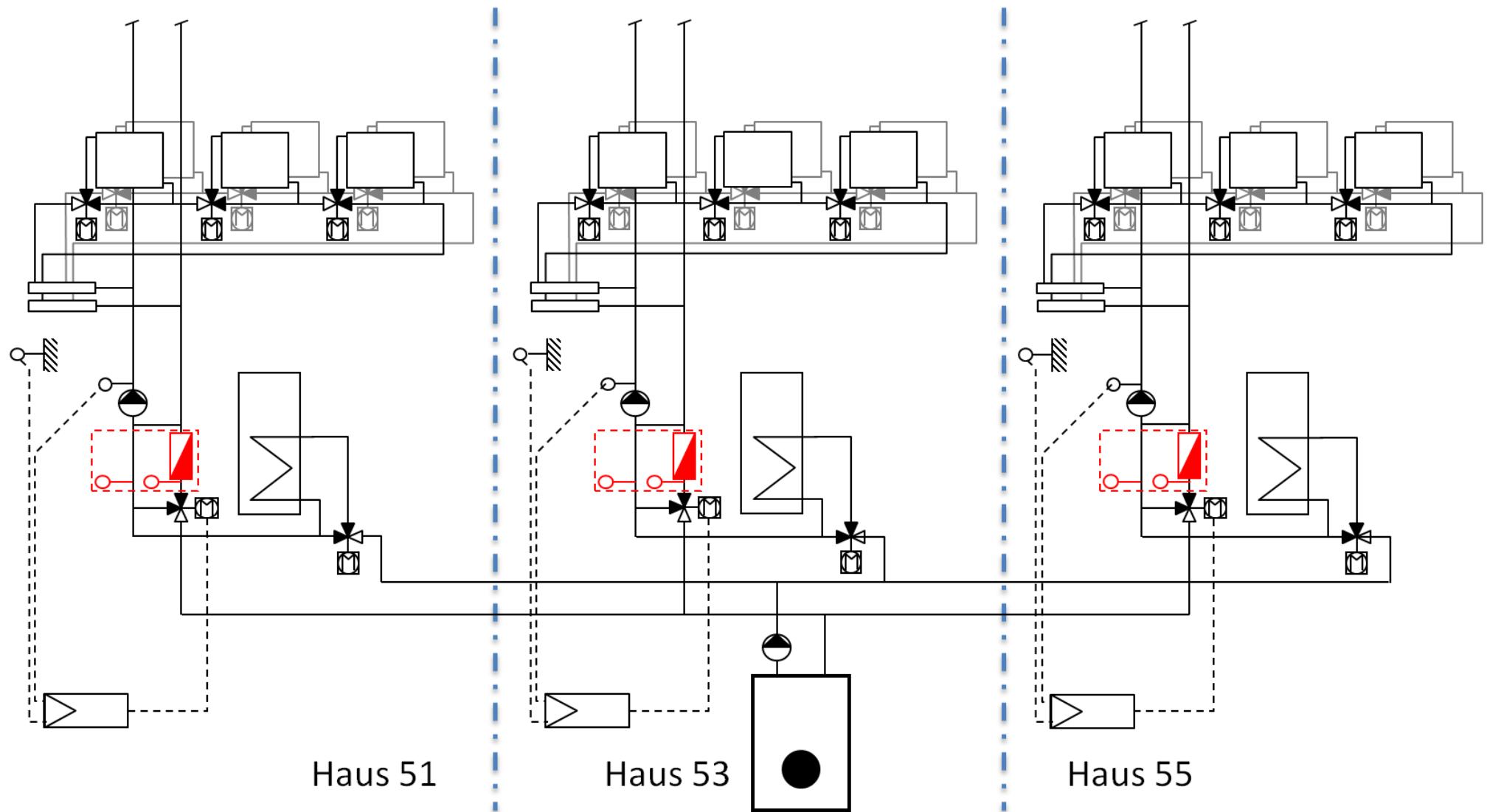
Weitere Entwicklungsschritte:

- Parameteroptimierung der deterministischen Korrektur-Offset-Berechnung: Der gegenwärtig eingesetzte Algorithmus zur Berechnung der Korrektur-Offsetwerte stützt sich auf ein empirisch gewähltes Parametersatz ab, das in wenigen Teilschritten mittels ungefähr gewählten Variationen etwas optimiert wurde. Eine systematische Ermittlung der optimalen Einstellung, welche ein Maximum an Energieeinsparung bei gleichzeitigem Minimum an Einbusse bezüglich den thermischen Raumkomfortkriterien liefert, wurde noch nicht durchgeführt. Es ist vorgesehen, solche Analysen mit einem Plugin zu IDA-ICE durchzuführen, das nach dem Paretoprinzip, Parametervariationen durchführt.
- Parallel dazu sehen wir die Weiterentwicklung eines selbstlernenden Algorithmus vor, welcher die Sollwertkorrektur auf Basis von Erfahrungswerten ermittelt, wenn bei der vorliegenden Anlage die dazu erforderlichen Betriebsdaten in ausreichendem Umfang vorliegen.
- Zur Visualisierung der Betriebsdaten wurde eine Webapplikation entwickelt, welche in einer ersten Fassung vorliegt. Diese wird weiterentwickelt, um damit eine beliebige Anzahl von Installationen abzubilden. Diese Plattform dient für den Endkunden dazu, seine Anlage über das Internet zu bedienen und die Betriebsdaten zu visualisieren. Für Pronoó GmbH soll die Applikation die eigentliche Verwaltung der angeschlossenen Installationen ermöglichen.

Wir möchten uns an dieser Stelle beim Projektpartner Aquametro AG aus Therwil für die kostenlose zur Verfügungstellung der Mess- und Aufzeichnungsgeräte herzlich bedanken.

Anhang

- A. Prinzipschema Heizungshydraulik
- B. Detektion des Fehlverhaltens EcoGateway in Geb. Nr. 53

Prinzipschema Heizungshydraulik

Prinzipschema der Wärmeerzeugung, der Primärverteilung sowie der Installationen pro Gebäude. In Rot die nachträglich eingebauten Wärmezähler.

Fehlverhalten EcoGateway Geb. Nr. 53

Im Februar 2015 wurde erkannt, dass der vom Wärmezähler aufgezeichnete Verbrauch von Gebäude 53 im Vergleich zu den beiden anderen unplausibel ist. (Erwartung: ca. wie Geb. 51). In der Folge wurde während einiger Tage der EcoGateway in Nr. 53 auf Bypass-Modus geschaltet, um festzustellen, ob damit das vom Wärmezähler erfasste Lastprofil wieder dem erwarteten entspricht (= Fehler beim EcoGateway) oder ob dies keine Änderung bewirkt (=Fehler beim Wärmezähler).

Die folgenden zwei Darstellungen stellen die vom Datenlogger aufgezeichneten Werte von je 4 Tagen dar:

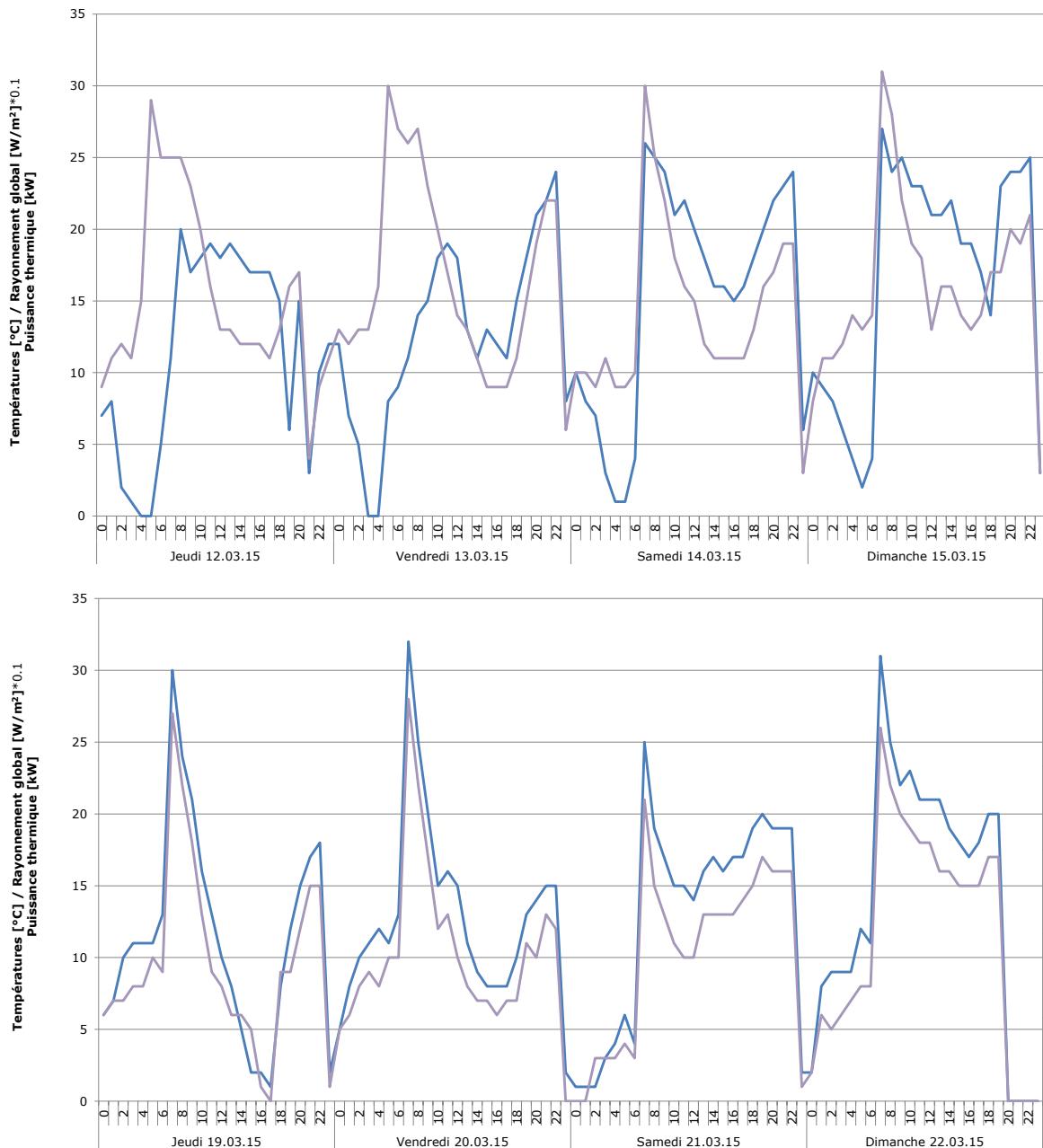


Abbildung 30: Wärmelastprofil von Geb. 53 (blau) und 51 (grau) vom 12.-15.03.2015 mit EcoGateway in Betrieb (oben) und vom 19.-22.03.2015 mit EcoGateway ausser Betrieb (unten).

Damit konnte gezeigt werden, dass beim EcoGateway in Geb. Nr. 53 eine Störung vorliegt, welche die Vorlauftemperatur und damit die Wärmeleistung in unzulässiger Weise variiert. In der Folge wurde das Gerät ausser Betrieb genommen und die Resultate von Geb. Nr. 53 ausser Acht gelassen.