

OBSERVE
Arbeitspaket B5
Implementierung und Evaluation der Methoden

Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 03ET1225C

Dr. Arnold Harmsen, Paul Harmsen, Erik Sewe, Kai
Kruppa, Nicolas Réhault
a.harmsen@plenuming.de
paul.harmsen@plenuming.de
erik.sewe@plenuming.de
kai.kruppa@haw-hamburg.de
nicolas.rehault@ise.fraunhofer.de

Plenum Ingenieurgesellschaft für Planung Energie Umwelt
mbH
Rantzaustraße 32, 22041 Hamburg

24. April 2018

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PLENUM

Zuwendungsempfänger:

Plenum Ingenieurgesellschaft für Planung Energie Umwelt mbH

Rantzaustraße 32, 22041 Hamburg

Förderkennzeichen:

03ET1225C

Vorhabensbezeichnung:

OBSERVE: Optimierung und Betriebsführung komplexer
Gebäudeenergieversorgungsanlagen;

Teilprojekt: Implementierung und Evaluation der Methoden

Laufzeit des Vorhabens:

01.09.2014 - 31.12.2017

Berichtszeitraum:

01.09.2014 - 31.12.2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	10
9.1 Beschreibung des Arbeitspakets	12
9.2 Überprüfung von Regeln für die Fehlererkennung	13
9.2.1 Eingabemaske	13
9.2.2 Term	14
9.2.3 Einrichtung einer automatischen Fehlererkennung	16
9.2.4 Dokumentation, Nachverfolgen von Fehlern	17
9.3 Dezentrale Regelungen (HAW)	19
9.3.1 LMT Group Schwarzenbek (HAW)	21
9.3.2 Konventioneller Regler LMT Group Schwarzenbek	24
9.3.3 Schule Mendelssohnstraße (HAW)	29
9.3.4 Konventioneller Regler Schule Mendelssohnstraße	31
9.4 LANUV Essen	32
9.4.1 Fehler	32
9.4.2 Maßnahmen	49
9.4.3 Warmwasserbereitung Kantine	56
9.5 Bezirksregierung Düsseldorf	57
9.5.1 Fehler	57
9.5.2 Maßnahmen	58
9.6 KPB Mettmann	67
9.6.1 Fehler	67
9.6.2 Maßnahmen	71
9.7 Schule Sterntalerstraße	75
9.7.1 Fehler	75
9.7.2 Maßnahmen	81
9.7.3 Bilanzierung	95
9.7.4 Entwicklung des Energieverbrauchs	95
9.7.5 Empfehlungen	98
9.7.6 Wärmeerzeugung im Vergleich zum Wärmebezug (IngSoft)	100
9.7.7 Anhebung der Heizkurve Sporthalle (IngSoft)	108
9.8 Schule Mendelssohnstraße	110
9.8.1 Fehler	110
9.8.2 Maßnahmen	111
9.9 LMT-Group	115
9.9.1 Fehler	115
9.9.2 Visualisierung der Volumenstromverteilung bei der LMT Group (HAW)	115
9.9.3 Maßnahmen	118
9.10 Kieback & Peter Zentrale Berlin (ISE)	125
9.10.1 Fehler (ISE)	127

9.10.2	Regelungseinstellungen, identifizierte Fehler, Korrekturmaßnahmen der gebäudetechnischen Anlagen (ISE)	128
9.11	DKB Zentrale Berlin (ISE)	150
9.11.1	Fehlerliste (ISE)	155
9.11.2	Regelungseinstellungen, identifizierte Fehler, Korrekturmaßnahmen der gebäudetechnischen Anlagen (ISE)	157
9.12	Umsetzung von Maßnahmen	194
9.12.1	Probleme bei der Umsetzung vorgeschlagener Maßnahmen	194
9.12.2	Überprüfung von Neuanlagen zur Abnahme	197
9.12.3	Förderung von Engagement	198
9.12.4	Beispielhafte Ergebnisse aus dem Anlagenmonitoring	198
9.12.5	Finanzielle Auswirkung energierelevanter Maßnahmen	198
9.13	Fazit	201
9.13.1	Verknüpfung von Modellentwicklung und Umsetzung	201
9.13.2	Finanzierungsmodell für Umrüstungen	201
9.13.3	Dauer von Forschungsvorhaben	201
9.13.4	Hemmnisse bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen	202
Literatur		203
Anhang		204
A	Schemata LANUV Essen	204
B	Bericht über die Identifikation von Bypässen im Heizungssystem sowie großer elektrischer Verbraucher im LANUV Essen vom 10. Oktober 2017	206
C	Bericht über die Messung des Stromverbrauchs in der Schule Sterntalerstraße vom 11. Juni 2015	214
D	Vorschlag Masterarbeit an der HAW	229

Abbildungsverzeichnis

9.2-1	Eingabemaske für regelbasierte Überprüfung	13
9.2-2	Schaltflächen zum Ausführen und Editieren der Regeln	14
9.2-3	Einabemaske zur Erstellung eines Tickets aus einem erkannten Fehler	18
9.3-1	Anbindung des Echtzeitsystems an die Anlage	20
9.3-2	Labora Aufbau mit DDC 4200 und cRIO Echtzeitsystem	20
9.3-3	Regelkreis eines Heizkreises	22
9.3-4	Möglichkeiten der Implementierung	22
9.3-5	Anbindung der Erzeuger an die Verbraucherregler	23
9.3-6	Anlage Mendelssohnstraße	29
9.3-7	Anbindung des Echtzeitsystems	30
9.4-1	Fehlfunktion Regelventil Kessel	36
9.4-2	Laufzeiten BHKW und Kessel	36
9.4-3	Startbedingungen Wärmeerzeuger	37
9.4-4	Laufzeiten BHKW	37
9.4-5	Rücklauftemperaturen BHKW	38
9.4-6	Leistung Gaskessel	38
9.4-7	Ausfall BHKW2	39
9.4-8	Mischventil Verbraucher im Handbetrieb	40
9.4-9	Mischventil Verbraucher ausgefallen	41
9.4-10	Pufferspeicher abgesperrt	42
9.4-11	Rücklauftemperaturen sehr hoch	42
9.4-12	Heizkurve	43
9.4-13	Verbrauch Warmwasser	44
9.4-14	Zu- und Ablufttemperatur	44
9.4-15	Außentemperaturen	45
9.4-16	Temperatur Pufferspeicher	46
9.4-17	Volumenstrom Verbraucherkreis	46
9.4-18	Volumenstrom Kessel	47
9.4-19	Datenausfall	48
9.4-20	Datenausfall Bereich Wärmeerzeugung	48
9.4-21	Fremdstromverbrauch im 1. Halbjahr 2013	52
9.4-22	Stromlastprofil mit Eigenerzeugung durch BHKW im 1. Halbjahr 2013	52
9.4-23	Betriebsstunden von BHKW 1 + 2, 2015	53
9.4-24	Leistungseinsparungen bei der Stromversorgung durch BHKW-Betrieb	53
9.4-25	Ablauf der Modellbildung und Betriebsanalyse [2]	54
9.4-26	Fühlerpositionen am Pufferspeicher	55
9.5-1	Heizungsabschaltung bei gleitendem Tagesmittelwert über 20°C, 2014	58
9.5-2	Heizungsdurchfluss vs. gleitender Tagesmittelwert, 2014	59
9.5-3	Heizleistung vs. Außentemperatur, 2012	59
9.5-4	Heizleistung vs. Außentemperatur, 2014	60
9.5-5	Raumtemperatur und Außentemperatur, 2014	60

9.5-6	Raumtemperatur vs. Außentemperatur, 2014	61
9.5-7	Grädigkeit WT1 2012 + 2016	62
9.5-8	Ventilstellung Wärmetauscher und Außentemperatur, 2016	63
9.5-9	Ventilstellung Wärmetauscher vs. Außentemperatur, 2016	63
9.5-10	Durchfluss und Differenzdruck, 20.9.-18.11.2017	64
9.5-11	Durchfluss vs. Differenzdruck, 20.9.-18.11.2017	65
9.5-12	Rücklauftemperatur und Differenzdruck, 20.9.-18.11.2017	65
9.5-13	Differenzdruck vs. Durchfluss, 1.1.-18.11.2017	66
9.7-1	Druckverlauf Geothermiesonden Haus 1 bis 5, 2014 - 2017	77
9.7-2	Heizleistungen Haus 5, Vergleich Winten 14/15 mit 15/16	79
9.7-3	Zulufttemperatur Haus 2 mit, Haus 5 ohne Geothermie	80
9.7-4	Vorlauftemperaturverlauf Heizkreis Klassenhäuser 7.2.2017	81
9.7-5	Ermittlung der Grundlast Haus 1	83
9.7-6	Leistungsaufnahme Haus 1 vor/nach Sollwertänderung Kühlung	84
9.7-7	Ermittlung der Grundlast Pausenhalle/Musikraum	85
9.7-8	Wärmeleistung Hallenheizung und elektrische Leistung der Sporthalle	88
9.7-9	Temperatur in der Sporthalle vor/nach Anhebung der Heizkurve	89
9.7-10	Durchfluss der Fernwärmeeinspeisung 28.5.-14.10.2015	90
9.7-11	Änderung des Differenzdrucks der Fernwärmeeinspeisung	91
9.7-12	Durchfluss der Fernwärmeeinspeisung 1.1.2016-8.1.2016	91
9.7-13	Vorlauftemperaturen Fernwärmeeinspeisung	92
9.7-14	Durchfluss Fernwärme über Außentemperatur 1.1.-17.2.2016	93
9.7-15	Durchfluss Fernwärme über Außentemperatur 22.2.-22.3.2016	93
9.7-16	Durchfluss Fernwärme über Außentemperatur Winter 2016/17	94
9.7-17	Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, gesamte Liegenschaft	100
9.7-18	Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 1	102
9.7-19	Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 2	103
9.7-20	Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 3	104
9.7-21	Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 4	106
9.7-22	Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 5	107
9.7-23	Anhebung Heizkurve Lüftung Sporthalle	108
9.7-24	Sporthalle Stromverbrauch für Lüftung	109
9.8-1	Hydraulikschema Schule Mendelssohnstraße (Auszug)	112
9.8-2	Zustand im Pavillon 18	113
9.9-1	Vereinfachtes Strukturbild der Anlage	116
9.9-2	Messdaten der Volumenströme in der Ringleitung	117
9.9-3	Visualisierung der Volumenströme in der Ringleitung zu verschiedenen Zeitpunkten	118
9.9-4	Vor- und Rücklauftemperaturen Halle 3, 4 + 5, 1.1.-31.3.2016	119
9.9-5	Temperaturen vs. Außentemperatur Halle 3, 4 + 5, 1.1.-31.3.2016	120
9.9-6	Differenzdruck vs. Durchfluss Einspeisung Zentrale 2016	120
9.9-7	Differenzdruck vs. Durchfluss Einspeisung Zentrale 2017	121
9.9-8	Leistungseinspeisung vs. Rücklauftemperatur	121
9.9-9	Kesselbetrieb am 6.12.2015	122
9.9-10	Temperaturen + Durchflüsse Kessel+Lager, 27.2.-1.3.2017	123
9.9-11	T-RL Lager vs. Kesseleinspeisung Halle 6, 27.2.-1.3.2017	123
9.9-12	Kompressorleistung vs. Kesseleinspeisung Halle 6, 27.2.-1.3.2017	124

9.10-1	Implementierung der qualitativen Modelle auf einem RaspberryPi (im Bild dargestellt ist eine qualitative Zustandstrajektorie eines Heizungssystems) (@ Fraunhofer ISE)	126
9.10-2	(Carpetplot - Minutenwerte - Kessel 1) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Rücklauftemperatur, Betriebssignal Kessel, Stellsignal Ventil, Fehlersignal (@ Fraunhofer ISE)	130
9.10-3	(Carpetplot - Minutenwerte - Kessel 2) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Rücklauftemperatur, Betriebssignal Kessel, Stellsignal Ventil, Fehlersignal (@ Fraunhofer ISE)	131
9.10-4	Anzahl der Stunden mit Unterschreitung der minimalen Kesselrücklauf-temperatur für Kessel 1 und Kessel 2 (@ Fraunhofer ISE)	132
9.10-5	(Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Anzahl Starts Kessel 1-Stufe 1, Anzahl Starts Kessel 1-Stufe 2, Anzahl Starts Kessel 2-Stufe 1, Anzahl Starts Kessel 2-Stufe 2 (@ Fraunhofer ISE)	133
9.10-6	Schalhäufigkeit der Kessel 2016 und 2017 (@ Fraunhofer ISE)	133
9.10-7	Synchronbetrieb und Nachlaufzeit der Pumpe Kessel 1 Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Betrieb Kesselbrenner 1-2, Betrieb Kessel-pumpe, Fehlersignal (@ Fraunhofer ISE)	134
9.10-8	Synchronbetrieb und Nachlaufzeit der Pumpe Kessel 2 Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Betrieb Kesselbrenner 1-2, Betrieb Kessel-pumpe, Fehlersignal (@ Fraunhofer ISE)	135
9.10-9	Gesamtwärmeverbrauch 2016/2017 (@ Fraunhofer ISE)	137
9.10-10	Gesamtwärmeverbrauch wetterbereinigt 2016/2017 (@ Fraunhofer ISE)	138
9.10-11	Verteilung des Wärmeverbrauchs 2017 pro Geschoss (@ Fraunhofer ISE)	139
9.10-12	(Scatterplot) Von unten nach oben: Vorlauftemperatur ($T_{V_L} [^{\circ}C]$), Rück-lauftemperatur ($T_{R_L} [^{\circ}C]$), Temperaturspreizung ($dT [K]$), Betriebsrückmel-dung ($Pumpe[-]$), Stellsignal ($Ventil[-]$) (@ Fraunhofer ISE)	140
9.10-13	(Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur ($[^{\circ}C]$), Vorlauf-temperatur ($T_{V_L} [^{\circ}C]$), Rücklauftemperatur ($T_{R_L} [^{\circ}C]$), Temperaturspreizung ($dT [K]$), Betriebsrückmeldung Pumpe ($[-]$), Stellsignal Ventil ($[-]$) (@ Fraunhofer ISE)	141
9.10-14	Zusammenfassung von Ergebnissen aus der automatisierten Auswer-tung des Heizkreises 3.OG von links nach rechts: Häufigkeitsverteilung des Fehlers im Tagesverlauf, Verteilung der Fehlerlänge, Verteilung der Messungen und Signale des Regels: Pumpensignal, Ventilöffnung, Vor- und Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	142
9.10-15	Visualisierung der Ergebnisse des erkannten Fehlers für den Heizkreis 3.OG (@ Fraunhofer ISE)	142
9.10-16	Winter 2016/2017 - Prozentsatz der Nutzungszeiten in Kat. I (hellgrün), Kat. II (dunkelgrün), Kat. III (orange) und außerhalb des Bereichs (rot) während der Belegungs- bzw. Nutzungszeit (@ Fraunhofer ISE)	144
9.10-17	Winter 2016/2017 - Raum 04 1.OG - Raumtemperatur und Grenzen der Kategorien I,II und III (@ Fraunhofer ISE)	145
9.10-18	Winter 2016/2017 - Raum 27 2.OG - - Raumtemperatur und Grenzen der Kategorien I,II und III (@ Fraunhofer ISE)	146
9.10-19	Sommer 2017 - Prozentsatz der Nutzungszeiten in Kat. I (hellgrün), Kat. II (dunkelgrün), Kat. III (orange) und außerhalb des Bereichs (rot) während der Belegungs- bzw. Nutzungszeit (@ Fraunhofer ISE)	147

9.10-20 Sommer 2017 - Raum 27 2.OG - - Raumtemperatur und Grenzen der Kategorien I,II und III (@ Fraunhofer ISE)	148
9.10-21 Sommer 2017 - Raum 16 5.OG - - Raumtemperatur und Grenzen der Kategorien I,II und III (@ Fraunhofer ISE)	149
9.11-1 Prinzipschema TGA-Anlagen Heizen/Kühlen (@ Fraunhofer ISE)	151
9.11-2 Prinzipschema TGA-Anlagen Heizen/Kühlen mit Zuordnung von Datenpunkten (@ Fraunhofer ISE)	152
9.11-3 Carpetplot zu Datenqualität ausgewählter Datenpunkte im DKB Gebäude (@ Fraunhofer ISE)	153
9.11-4 Carpetplot zu Datenqualität ausgewählter Datenpunkte im DKB Gebäude (@ Fraunhofer ISE)	153
9.11-5 Stromverbrauch (@ Fraunhofer ISE)	158
9.11-6 Fernwärmeverbrauch (Daten aus 2017 sind unvollständig) (@ Fraunhofer ISE)	159
9.11-7 Fernwärmeverbrauch (Daten aus 2017 sind unvollständig) (@ Fraunhofer ISE)	159
9.11-8 Elektrische Leistungsaufnahme Kälteanlage und Rückkühlung (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine, Elektrische Leistungsaufnahme Rückkühlung, Elektrische Leistungsaufnahme Rückkühlung mechanische Kühlung, Elektrische Leistungsaufnahme Rückkühlung freie Kühlung (@ Fraunhofer ISE)	161
9.11-9 Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine 2015-2017 - Tagesmittelwerte - Gelb: neue Kältemaschine (@ Fraunhofer ISE)	162
9.11-10 Stromverbrauch Kälteanlage (@ Fraunhofer ISE)	162
9.11-11 Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine RLT02 (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine (@ Fraunhofer ISE)	163
9.11-12 Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine RLT03 (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine (@ Fraunhofer ISE)	163
9.11-13 Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine RLT02 2015-2017 - Tagesmittelwerte (@ Fraunhofer ISE)	164
9.11-14 Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine RLT03 2015-2017 - Tagesmittelwerte (@ Fraunhofer ISE)	164
9.11-15 Heiz-/Kühlkreis Deckenheizung/-kühlung (KAE Kühldecken Büros) (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), Rücklauftemperatur (T_RL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	166
9.11-16 Paralleler Betrieb der Kühldecken und der statischen Heizung (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Leistung Kühldecken, Leistung statische Heizung, Signal des parallelen Betriebs (@ Fraunhofer ISE)	167
9.11-17 Kälteleistung Deckenkühlung - Tagesmittelwerte (@ Fraunhofer ISE)	168
9.11-18 Kühlkreis Deckenkühlung - Verteilung der Vorlauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	168
9.11-19 Kühlkreis Deckenkühlung - Verteilung der Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	169
9.11-20 Kühlkreis Deckenkühlung - Verteilung der Temperaturspreizung (@ Fraunhofer ISE)	169

9.11-21 Heiz-/Kühlkreis Stege (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), Rücklauftemperatur (T_RL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	171
9.11-22 Heizleistung Heiz-/Kühlkreis Stege - Tagesmittelwert (@ Fraunhofer ISE)	171
9.11-23 Heizkreis statische Heizung (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Rücklauftemperatur (T_RL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	173
9.11-24 Heizkreis statische Heizung 2015 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_RL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	174
9.11-25 Heizkreis statische Heizung 2016 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_RL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	175
9.11-26 Heizkreis statische Heizung 2017 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_RL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	176
9.11-27 Heizleistung statische Heizung - Tagesmittelwert (@ Fraunhofer ISE)	177
9.11-28 Heizkreis statische Heizung - Verteilung der Vorlauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	177
9.11-29 Heizkreis statische Heizung - Verteilung der Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	178
9.11-30 Heizkreis statische Heizung - Verteilung der Temperaturspreizung (@ Fraunhofer ISE)	178
9.11-31 Kühlkreis Umluftkühlgeräte (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), Rücklauftemperatur (T_RL), Temperaturspreizung (dT), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	180
9.11-32 Kälteleistung Umluftkühlgeräte - Tagesmittelwert - Gelb: ab IBN neuer Kältemaschine (@ Fraunhofer ISE)	181
9.11-33 Kühlkreis Umluftkühlgeräte - Verteilung der Vorlauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	181
9.11-34 Kühlkreis Umluftkühlgeräte - Verteilung der Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	182
9.11-35 Kühlkreis Umluftkühlgeräte - Verteilung der Temperaturspreizung (@ Fraunhofer ISE)	182
9.11-36 Heizkreis Fußbodentemperierung (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	184
9.11-37 Heizleistung Fußbodentemperierung - Tagesmittelwert (@ Fraunhofer ISE)	184
9.11-38 Heizkreis RLT-Anlage 03 (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	186
9.11-39 Heizkreis RLT-Anlage 03 - Verteilung der Vorlauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	187
9.11-40 Heizkreis RLT-Anlage 03 - Verteilung der Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)	187
9.11-41 Heizkreis RLT-Anlage 03 - Verteilung der Temperaturspreizung (@ Fraunhofer ISE)	188

9.11-42	Heizkreis RLT-Anlage 03 Jahr: 2015 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T _{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	189
9.11-43	Heizkreis RLT-Anlage 03 Jahr: 2016 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T _{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	190
9.11-44	Heizkreis RLT-Anlage 03 Jahr: 2017 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T _{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)	191
9.11-45	Heizkreis RLT-Anlage 01 (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, elektrische Leistung (@ Fraunhofer ISE)	192
9.11-46	RLT-Anlage 03 (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, elektrische Leistung (@ Fraunhofer ISE)	193
9.11-47	Elektrische Leistungsaufnahme RLT03 2015-2017 - Tagesmittelwerte (@ Fraunhofer ISE)	193
A-1	Warmwasserbereitung LANUV Essen	204
A-2	Wärmeerzeugung LANUV Essen	205
B-3	Zeitverlauf Durchflussmessung LANUV Essen	208
B-4	T-RL Laborlüftungen über Vorlauftemperatur 1.1. - 4.10.2017	210
B-5	Durchfluss der Speicherladung/entladung.	211
B-6	Durchfluss Speicherladung, stationäre Messung vs. mobile Messung	211
B-7	Leistungsverlauf erstes Halbjahr 2013.	212
C-8	Klassengebäude Schule Sterntalerstraße	214
C-9	Leistungsmessung über zwei Wochen, 9.4.2015 - 22.4.2015	220
C-10	Grundlast 4.4.2015, exemplarisch Hausanschluss, Sporthalle und Haus 1	220
C-11	Leistungsaufnahme zur Kühlung der ELA über T-Außen	222
C-12	Leistungsaufnahme Musikraum und Pausenhalle, 13.-20.4.2015	225
C-13	Leistungsaufnahme der Sporthalle	226

Tabellenverzeichnis

9.2-1	Operatoren für regelbasierte Fehlererkennung	14
9.2-2	Bedingungsoperator für regelbasierte Fehlererkennung	15
9.2-3	Aggregatfunktionen für regelbasierte Fehlererkennung	15
9.2-4	Funktionen für die Überprüfung von Lauf-, Pausenzeiten und Starthäufigkeiten	16
9.2-5	Weitere Funktionen	16
9.2-6	Anwendungsbeispiele regelbasierter Überprüfung	17
9.4-1	Relevante Fehler im LANUV Essen	32
9.4-2	Fehlerliste für regelbasierte Fehlererkennung. Die Zuordnung der Datenpunkte zum Anlagenschema ist im Anhang A gegeben.	34
9.5-1	Relevante Fehler Bezirksregierung Düsseldorf	57
9.6-1	Relevante Fehler Kreispolizeibehörde Mettmann	67
9.7-1	Relevante Fehler Schule Sterntalerstraße	76
9.7-2	Heizenergie Haus 5, absolut und anteilig. Im Winter 2014/15 war die Geothermie in Betrieb im Winter 2015/16 ausgefallen.	78
9.7-3	Zusammenfassung der erzielten Einsparungen. Die Preise (Brutto) von 2017 betragen 21,48 Cent/kWh elektrisch, 7,36 Cent/kWh Fernwärme (Arbeitspreis) und 7,616 Cent/l/h/a Fernwärme (Leistungspreis).	82
9.7-4	Einsparungen durch Reduzierung der Spüllüftungen in Klassenhäusern	86
9.7-5	Wärmeverbräuche der Hallenheizung und Stromverbrauch der Sporthalle. Vergleichszeitraum 2016: 20.3.-1.5. 2017: 19.3.-30.4.	88
9.7-6	Entwicklung der Energieverbräuche in der Schule Sterntalerstraße	95
9.7-7	Bilanzierung 2013	96
9.7-8	Verteilungsverluste in der Schule Sterntalerstraße 2013-2014	97
9.7-9	Wärmeverbrauch gesamte Liegenschaft	101
9.7-10	Wärmeverbrauch Haus 1	102
9.7-11	Wärmeverbrauch Haus 2	103
9.7-12	Wärmeverbrauch Haus 3	105
9.7-13	Wärmeverbrauch Haus 4	106
9.7-14	Wärmeverbrauch Haus 5	107
9.7-15	Wärme und elektrischer Verbrauch Sporthalle	109
9.8-1	Relevante Fehler Schule Mendelssohnstraße	110
9.9-1	Relevante Fehler LMT-Group	115
9.9-2	Zuordnung der Datenbankbezeichner zu den Messstellen	117
9.10-1	Fehlerliste	127
9.10-2	Räume mit Temperaturmessungen	143
9.10-3	Kategorien des Innenraumklimas und PPD/PMV Indizes für die Heizperiode nach EN ISO 7730/EN 15251	143
9.10-4	Kategorien des Innenraumklimas und PPD/PMV Indizes für die Kühlperiode nach EN ISO 7730/EN 15251	144
9.11-1	Relevante Fehler	155

B-1	Bypässe im Verbraucherkreis des LANUV Essen	209
B-2	Gemessene Leistungen	213
C-3	Messstellen der Leistungsmessung in der Schule Sterntalerstraße	216
C-4	Durchschnittsleistungen P_{avg} der gemessenen Verbrauchsstellen	218
C-5	Grundlast P_{GL} ausgewählter Verbrauchsstellen	219
C-6	Identifizierte Mehrverbräuche, welche in keinem Zusammenhang zu der energetischen Sanierung stehen.	222
C-7	Stromverbrauch durch mechanische Lüftung der Klassenhäuser	223
C-8	Identifizierte Mehrverbräuche, welche auf die Sanierung zurück zu führen sind	224
C-9	Maßnahmen zur Reduzierung des Stromverbrauchs	227

9.1 Beschreibung des Arbeitspakets

Für die einzelnen Objekte wurden zu bearbeitenden Fragestellungen aus der Vorkenntnis und den Interessen der Betreiber entwickelt. Da nicht alle Fragestellungen in gleicher Tiefe bearbeitet werden können fand nach Absprache mit den Projektpartnern eine exemplarische Schwerpunktsetzung statt. Die Implementierung der Methoden sollte rechtzeitig erfolgen, damit einen ausreichender Zeitraum für die Optimierung gegeben, und eine Bilanzierung und Bewertung möglich ist.

Plenum hat das Arbeitspaket *Implementierung und Evaluation der Methoden* geleitet. Beiträge von Projektpartnern sind in den Überschriften der jeweiligen Kapitel / Unterkapitel gekennzeichnet. Die Tabellen enthalten eine Übersicht der wichtigsten in allen Objekten gefundenen Fehler und enthalten folgende Spalten:

- **Fehler:** Benennung des Fehlers
- **Erkannt durch:** Wie wurde der Fehler erkannt?
- **Maßnahme:** Mit welcher Maßnahme kann der Fehler behoben werden?
- **Status:** Wie ist der Status der Fehlerbehebung zum Berichtszeitpunkt?

Die theoretischen Grundlagen der Fehlererkennung, welche von der Plenum GmbH erarbeitet wurden, sind im Arbeitspaket B.3 beschrieben. Die Umsetzung der regelbasierten Fehlererkennung ist in Kapitel 9.2 dargestellt. Die wichtigsten in den Demonstrationsobjekten gefundenen Fehler werden in den Kapiteln 9.4 - 9.11 jeweils tabellarisch zusammengefasst und diskutiert.

Aufgrund der komplexen Anlage und der bekannten Versorgungsprobleme im Objekt der LMT-Group in Schwarzenbek wurde diese Anlage ausgewählt, um moderne Regelungskonzepte zu testen. Hierzu wurde durch die HAW ein dezentrales Regelungskonzept erarbeitet, welches versuchsweise auf einem Echtzeitsystem laufen sollte. Zusätzlich wurde durch die Plenum GmbH ein konventionelles Regelungskonzept entworfen, welches im Falle von Problemen mit den verteilten Regelungsreglern der HAW verwendet werden sollte. Im Zuge der Projektierung entschied sich die LMT-Group jedoch für eine Regelung der Firma Honeywell, ohne dass eine Möglichkeit für die Einbindung des an der HAW entwickelten dezentralen Reglers umgesetzt wurde, so dass die durch Plenum und die HAW geplanten Regelungen nicht in der Praxis erprobt werden konnten. Die entwickelten Regelungskonzepte werden jedoch in Kapitel 9.3 erläutert.

Bei der Implementierung der Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung und Energieeinsparung wurden mit den verschiedenen Betreibern und Nutzern vielfältige Erfahrungen gemacht. Zusätzlich zu den Beschreibungen der Einzelmaßnahmen in den Kapiteln 9.4.2 bis 9.11.2 findet sich in Kapitel 9.12 eine exemplarische Zusammenfassung der dabei gewonnenen Erkenntnisse.

Im Kapitel 9.13 werden schließlich Schlussfolgerungen aus den Erfolgen und Hindernissen bei der Umsetzung der Maßnahmen getroffen, welche insbesondere Hinweise für die zukünftige Planung und Umsetzung von Forschungsvorhaben bieten.

9.2 Überprüfung von Regeln für die Fehlererkennung

Die Erkennung von Fehler im laufen Betrieb liefert die Voraussetzung für

- deren Behebung,
- die Beurteilung der Auswirkung von Änderungen im Anlagenbetrieb durch die Implementierung neuer Funktionen und Regelungsmethoden, sowie
- die Eingrenzung von Trainingsbereichen für die Fehlererkennung.

Im laufedes Projektes wurde eine automatisierte regelbasierte Überprüfung der Demonstrationsobjekte eingeführt. Die Prüfung erfolgt erfolgt aus Effizienzgründen auf Datenbankebene direkt in SQL. Es wurde eine Benutzeroberfläche in PHP und JavaScript programmiert, die es dem Nutzer ermöglicht ohne Programmierkenntnisse Regeln zu erstellen und zu nutzen. Zum Berichtszeitpunkt sind 143 aktive Regeln definiert, von denen je Tag im Schnitt etwa 30 Regeln einen Fehler melden. In diesem Kapitel wird die Software vorgestellt, mit denen die Regeln eingerichtet und automatisch geprüft werden. Für die Einrichtung der Fehler-Schwellwerte wird Expertenwissen benötigt. Das Vorgehen wurde auch auf dem OBSERVE-Workshop am 2. Tag vorgestellt [3].

Eine Regel wird nach der folgenden Struktur definiert:

Definition: WENN *Bedingung erfüllt* DANN Fehler

9.2.1 Eingabemaske

In der Eingabemaske (Abbildung 9.2-1) wird die zu überprüfende Bedingung eingetragen.

Tabelle: demo	Enddatum:	Batch-Tage (max. 30): 1					
FehlerID	Status	Name	Term	Zeitfenster (Minuten)	Geltungsbereich	Zeitraum (max. 30 Tage)	Kommentar

Abbildung 9.2-1: Eingabemaske für regelbasierte Überprüfung

- Tabelle: Auswahl der Tabelle für welche eine Fehlererkennung eingerichtet werden soll.
- Enddatum: bei einer manuellen Überprüfung der Fehlerregel gibt dies den aktuellsten Tag für welchen die Regel überprüft wird an.
- Batch-Tage: bei einer manuellen Überprüfung der Fehlerregel wird hier die Länge des zu überprüfenden Zeitraums angegeben.
- FehlerID: wird beim Speichern neuer Regeln automatisch fortlaufend pro Gebäude vergeben.
- Status: ein bedeutet Regel aktiv, aus bedeutet Regel inaktiv.

- Name: Klartextname des Fehlers.
- Term: Die zu überprüfende Regel wird hier eingetragen, die möglichen Operatoren sind in Kapitel 9.2.1 aufgeführt.
- Zeitfenster: Anzahl der Minuten, für die die Bedingung (Term) durchgehend erfüllt sein muss, damit ein Fehler vorliegt. Standardwert: 1
- Geltungsbereich: Einschränkung der Uhrzeit, für die die Prüfung durchgeführt werden soll, beispielsweise 22:00-05:00 oder 10:00-16:00. Standardwert: 00:00-23:59, d.h. zu jeder Zeit.
- Zeitraum: Anzahl der Tage, für die die Prüfung durchgeführt wird. (Maximalwert wird automatisch begrenzt.)
- Kommentar: Eine genauere Erläuterung des Fehlers. Da zwischen Fehlerdefinition und Auftreten lange Zeiträume liegen können ist eine präzise Beschreibung bei der späteren Fehleranalyse hilfreich.

Mit den Schaltflächen, dargestellt in Abbildung 9.2-2, links der jeweiligen Fehlerdefinition können folgende Aktionen ausgeführt werden:



Abbildung 9.2-2: Schaltflächen zum Ausführen und Editieren der Regeln

- Regel anwenden / Ergebnis speichern, sofern Regel aktiv
- SQL-Statement anzeigen
- Regel bearbeiten
- Regel duplizieren
- Regel löschen

9.2.2 Term

Die Regel wird gebildet, indem der Term interpretiert und zusammen mit den Nebenbedingungen in ein SQL-Statement übersetzt wird. Das Ergebnis des Terms muss immer "wahr" oder "falsch" sein.

Die Operatoren der Tabelle 9.2-1 können frei miteinander kombiniert werden:

Operator	Beschreibung	Beispiel
> < = !=	Vergleiche	cXXXX > 50
AND, OR, XOR	logische Verknüpfungen	cXXXX = 1 AND cYYYY > 0
+ - x /	Grundrechenarten	cXXXX + cYYYY > 2

Tabelle 9.2-1: Operatoren für regelbasierte Fehlererkennung

Mit *IF* können Einschränkungen formuliert werden, wie z.B. Prüfung nur bei Außentemperaturen größer einem Grenzwert, siehe Tabelle 9.2-2. Dies schränkt die Daten ein, auf denen der Test durchgeführt wird, die in Tabelle 9.2-1 genannten Operatoren können dadurch verknüpft werden.

Operator	Beschreibung	Beispiel
IF	Bedingung	(cXXXX = 1) IF (cYYYY) > 17

Tabelle 9.2-2: Bedingungsoperator für regelbasierte Fehlererkennung

Die in Tabelle 9.2-3 aufgeführten Aggregatfunktionen können nach dem Schema *[funktion()] [Vergleichsoperator] [Grenzwert]* genutzt werden. Weitere Kombinationen sind eingeschränkt möglich. Eine Einschränkung des Zeitfensters ist nicht möglich.

Funktion	Beschreibung	Beispiel
max()	Maximalwert	max(cXXXX) > 50
min()	Minimalwert	min(cXXXX) > 50
avg()	Durchschnittswert	avg(cXXXX) > 50
corr()	Korrelation	corr(cYYYY, cXXXX) > 0.5
stddev()	Standardabweichung	stddev(cXXXX) > 0.5
sum()	Summe	sum(cXXXX) > 100
regr_slope()	X über Y, Steigung der Ausgleichsgerade	regr_slope(cYYYY, cXXXX) > -0.5
regr_intercept()	X über Y, Schnittpunkt der Ausgleichsgerade mit der y-Achse	regr_intercept(cYYYY, cXXXX)
variance()	Varianz	variance(cXXXX)

Tabelle 9.2-3: Aggregatfunktionen für regelbasierte Fehlererkennung

Für die Überprüfung von Laufzeiten, Pausenzeiten und Starthäufigkeiten wurden die in Tabelle 9.2-4 dargestellten Funktionen entwickelt. Sie können nur nach dem Schema `[funktion()] [Vergleichsoperator] [Grenzwert]` genutzt werden und funktionieren für Datenpunkte die *bit* (0,1) beinhalten.

Funktion	Beschreibung	Beispiel
<code>count_on()</code>	Anzahl der Startvorgänge (Sprung von 0 auf 1)	<code>count_on(cXXXX) > 24</code>
<code>count_off()</code>	Anzahl der Ausschaltvorgänge (Sprung von 1 auf 0)	<code>count_off(cXXXX) > 24</code>
<code>count_short_on()</code>	Anzahl der Laufzeiten unter Grenzwert	<code>count_short_on(c0XXXX, 60) > 1</code>
<code>count_short_off()</code>	Anzahl der Pausenzeiten unter Grenzwert	<code>count_short_off(c0XXXX, 60) > 1</code>

Tabelle 9.2-4: Funktionen für die Überprüfung von Laufzeiten, Pausenzeiten und Starthäufigkeiten

Folgende weitere Funktionen wurden implementiert, Tabelle 9.2-5:

Funktion	Beschreibung	Beispiel
<code>greatest()</code>	Höchstwert verschiedener Datenpunkte	<code>greatest(cXXXX, cYYYY, ...) < 50</code>
<code>slope()</code>	Ableitung	<code>slope(cXXXX) > 2</code>

Tabelle 9.2-5: Weitere Funktionen

9.2.3 Einrichtung einer automatischen Fehlererkennung

Wenn eine Regel für eine Automatische Überprüfung eingerichtet werden soll, läuft dies folgendermaßen ab:

1. Regel definieren.
2. Ggf. Enddatum und gewünschten Anzahl der Tage wählen. In der Grundeinstellung wird der letzte verfügbare Tag gewählt.
3. Schaltfläche  "Test jetzt ausführen" anklicken. Das Ergebnis erscheint als Liste für die gewählten Tage. An den Tagen welche mit "TRUE" markiert sind liegt der Fehler vor, an den Tagen welche mit "FALSE" markiert sind liegt der Fehler nicht vor.
4. Wenn die Regel das gewünschte Ergebnis liefert ist nichts weiter zu unternehmen, sie wird ab sofort täglich überprüft. Anderenfalls sollte sie korrigiert werden so dass sie das gewünschte Ergebnis liefert oder inaktiv gesetzt werden.

Name	Term	Zeitfenster	Zeitraum
Wasserverbrauch	$\max(c0195) - \min(c0195) > 3$	0	1
Laufzeit BHKW 1	$\text{count_short_on}(c0124, 60) > 1$	0	1
Kesselvolumenstrom bei Betrieb	$c0030 = 1 \text{ AND } c0298 < 0.001$	5	1
3-Wege-Mischer Hauptvorlauf	$c0316 < c0213 - 5 \text{ AND } c0309 > c0213$	15	1

Tabelle 9.2-6:

Anwendungsbeispiele regelbasierter Überprüfung.

c0195: Wasserverbrauch [m³]

c0124: Betriebsmeldung BHKW [bit]

c0030: Freigabe Brenner [bit]

c0298: Durchfluss Kessel [m³/h]

c0316: Vorlauftemperatur Heizkreis [°C]

c0213: Vorlauftemperatur Heizkreis Sollwert [°C]

c0309: Vorlauftemperatur Verteiler [°C]

Anwendungsbeispiele aus dem Demonstrationsobjekt LANUV Essen

In Tabelle 9.2-6 sind Anwendungsbeispiele für die regelbasierte Fehlererkennung mit der von PLENUM entwickelten Software dargestellt.

Im Kapitel 9.4 werden für das Demonstrationsobjekt LANUV Essen konkrete Anwendungsbeispiele für die regelbasierte Fehlererkennung gezeigt und deren Bedeutung diskutiert.

9.2.4 Dokumentation, Nachverfolgen von Fehlern

Zur Dokumentation und Vereinfachung der Arbeitsabläufe wurde bei PLENUM ein Ticketsystem eingerichtet. Dieses ist mit der Datenvisualisierung und der automatisierten Datenüberprüfung verknüpft:

Aus der Fehlererkennung kann über eine Schaltfläche ein Ticket erstellt werden, wobei die relevanten Informationen wie Bearbeiter, Gebäude, betroffene Datenpunkte und Zeitpunkt automatisch übergeben werden. Hierdurch werden Tippfehler vermieden und sichergestellt, dass keine relevanten Informationen fehlen. Dieser Vorgang ist in Abbildung 9.2-3 zu sehen.

Der Bearbeiter, dem die Bearbeitung des Tickets zugewiesen wird, trägt in diesem bei Änderungen den jeweils aktuellen Stand ein. Bei Bedarf kann auch die aufgewendete Arbeitszeit pro Ticket erfasst werden. Ist das Problem aus Sicht des Bearbeiters behoben, wird das Ticket dem Ersteller zugewiesen, der es nach erfolgreichem Test schließt, oder zur weiteren Bearbeitung zurück gibt.

Das Ticketsystem besitzt unter anderem Such- und Statistikfunktionen, welche den Umgang mit einer großen Anzahl von Tickets erleichtern. Des Weiteren können Tickets priorisiert und mit Terminen versehen werden. Zur Verbesserung der Übersicht wurde eine automatische Wiedervorlage implementiert, durch die der Bearbeiter nur jeweils die Tickets sieht, an denen aktuell gearbeitet werden kann.

Bei größerem Interesse ist es denkbar, dass auch Kunden einen Zugang zum Ticket-system bekommen, um die Kommunikation zur Fehlerbehebung zu verbessern.

Project **Gebäude**

Issue Type **Problem**

Summary*

Priority ?

Due Date

Wiedervorlage

Assignee

Component/s

Start typing to get a list of possible matches or press down to select.

Gebäude

Begin typing to find and create labels or press down to select a suggested label.

Labels

Begin typing to find and create labels or press down to select a suggested label.

Description

Attachment No file selected.

The maximum file upload size is 10.00 MB.

Abbildung 9.2-3: Einabemaske zur Erstellung eines Tickets aus einem erkannten Fehler

9.3 Dezentrale Regelungen (HAW)

Bei der LMT-Group erfolgt eine Wärmeeinspeisung in die Ringleitung aus drei räumlich getrennten Erzeugungsanlagen. Bisher erfolgt eine Einschaltung der Wärmeerzeuger manuell bei erkannten oder vermuteten Unterversorgungen. Entsprechendes gilt für das Ausschalten von Wärmeerzeugern.

In der Zentrale sind drei Wärmeerzeuger vorhanden, welche nicht automatisch mit der benötigten Leistung betrieben werden. Insbesondere werden die Wassermengen auf der Erzeugungsseite nicht an die Wassermengen auf der Verbrauchsseite angepasst, so dass es zu Kurzschlüssen über die Hydraulische Weiche kommt, welche eine Brennwertnutzung verhindern.

Eine dezentrale Regelung, welche den Betrieb der Wärmeerzeuger optimiert, wurde von der HAW untersucht und wird nachfolgend beschrieben.

Die entwickelten Reglerentwurfsverfahren wurden in Arbeitspaket A4 vorgestellt und deren Funktionalität in Simulationen gezeigt. Zum Test der entwickelten Algorithmen in realen Betriebsbedingungen soll im Folgenden die Implementierung der Ansätze auf einem Echtzeitsystem beschrieben werden. Zudem wird ein Konzept zur Anbindung des auf dem Echtzeitsystem implementierten Reglers an ein Demogebäude vorgestellt, um diesen als Reglerdemonstrator zu nutzen. Das Ziel ist zunächst eine temporäre Implementierung an der Anlage und keine dauerhafte Installation. Die Entwicklung der Regler erfolgte in der Entwicklungsumgebung MATLAB/Simulink auf einem Standard-PC. Eine direkte Verwendung der Regler aus dieser Implementierung heraus ist nicht möglich, da ein Zugriff auf die realen physikalischen Signale so nicht erfolgen kann und das System nicht auf einem festen vorgegebenen Takt ausgeführt werden kann. Daher ist eine Implementierung auf einem Echtzeitsystem notwendig. Hierbei fiel die Wahl auf das Echtzeitsystem cRIO der Firma National Instruments, welche hinsichtlich der Abtastzeit und der Rechenperformance den hier gestellten Anforderungen genügen soll. Diese Systeme werden über die Programmiersprache LabVIEW programmiert. Ein Vorteil von LabVIEW für die angestrebte Reglerimplementierung ist eine Schnittstelle zu MATLAB/Simulink, sodass die zuvor in MATLAB/Simulink entwickelten Algorithmen mit möglichst geringen Änderungen eingebunden werden können. Dies ist zum einen direkt möglich, zum Anderen ist z.T. eine Codegenerierung aus MATLAB notwendig, welche teilweise Anpassungen in den Algorithmen erfordern. Hinsichtlich der Kommunikation mit der realen Anlage ist das cRIO System sehr flexibel und modular aufgebaut. Zum einen ist es möglich über Steckkarten, den Controller mit mehreren digitalen und analogen Ein- und Ausgängen zu bestücken und darüber mit der Anlage zu kommunizieren. Zudem ist eine Netzwerkschnittstelle verfügbar. Gemeinsam mit dem zusätzlichen "BACnet/IPToolkit für LabVIEW" ist es möglich, über eine Netzwerkschnittstelle mit der Anlage zu kommunizieren, vorausgesetzt in der Anlage ist eine BACnet Kommunikation aufgebaut.

Das Ziel ist eine einfache Anbindung eines solchen Reglerdemonstrators an eine bestehende Anlage. Schließt man alle Aktoren und Sensoren einzeln an den Demonstrator an, ist dies zum einen sehr aufwendig, da jede Komponente einzeln betrachtet und verdrahtet werden müsste. In den betrachteten Gebäuden sind bereits zentrale Automationsstationen, z.B. die DDC 4200 von Kieback&Peter oder der Excel Controller von Honeywell, vorhanden, die bereits mit den Sensoren und Aktoren verknüpft sind und kommunizieren. Diese Automationsstationen sollen daher als Schnittstelle genutzt

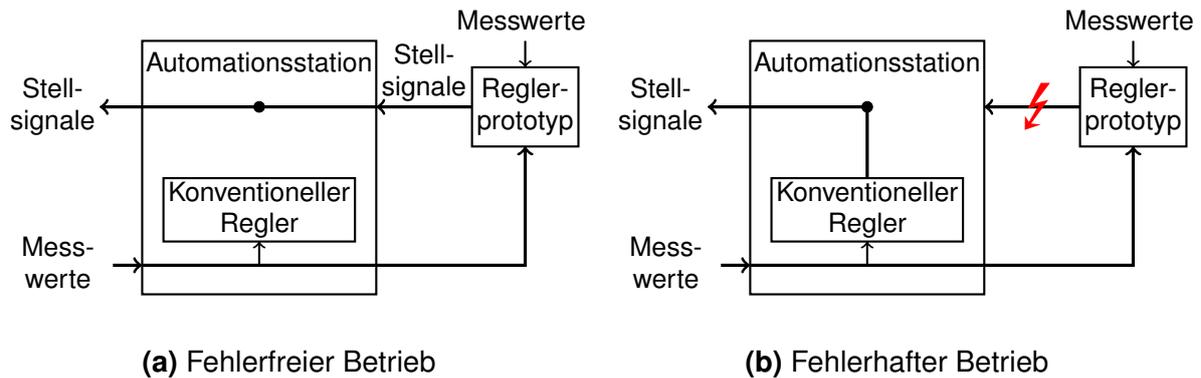


Abbildung 9.3-1: Anbindung des Echtzeitsystems an die Anlage

werden. An der Anlagentechnik hinter der Automationsstation ist somit keine Änderung erforderlich. Es ist nur notwendig, dass eine Schnittstelle zwischen Echtzeitsystem und Automationsstation aufgebaut wird. Diese kann z.B. durch analoge Signale oder BAC-net realisiert werden. Die Messsignale können dann über die Automationsstation an das Echtzeitsystem weitergegeben werden. Das Echtzeitsystem berechnet die Stell-signale für die Aktoren, die dann über die Automationsstation an die Anlage weitergegeben werden. Somit kann auf die in der Anlage bestehende Infrastruktur zurückgegriffen werden, ohne sie verändern zu müssen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Automationsstation von dem Echtzeitsystem unabhängig ist und in dem Regelkreis enthalten bleibt. Somit kann sie die Signale, die von dem Echtzeitsystem kommen, auf Plausibilität prüfen und den Zustand der Anlage überwachen. Da die Automationsstation weiterhin in der Anlage angebunden ist, bietet sie somit eine Rückfallebene für den Fall, dass in dem Echtzeitsystem ein Fehler auftritt. In diesem Fall kann auf die alte/konventionelle Regelung umgeschaltet werden, um so die Anlage weiterhin sicher betreiben zu können. Für eine solche Anlagenüberwachung sind zum einen minimale und maximale Grenzwerte für bestimmte Signale, wie

- Stell-signale,
- Vorlauf- und Rücklauf-temperatur
- Volumenstrom
- Raumtemperaturen

einzuhalten. Zum anderen wird ein "Keepalive"-Signal ausgegeben, um sicherzustellen, dass die Kommunikation zwischen Echtzeitsystem und Automationsstation dauerhaft funktioniert und Werte liefert. In Abbildung 9.3-1 ist diese Integration des Echtzeitsystems schematisch dargestellt. Ein Testaufbau der Kommunikation zwischen der Automationsstation DDC 4200 und dem cRIO Echtzeitsystem ist in Abbildung 9.3-2 dargestellt.

BLID VON DDC + CRIO

Abbildung 9.3-2: Laboraufbau mit DDC 4200 und cRIO Echtzeitsystem

Das beschriebene Konzept der Regleranbindung soll verwendet werden, um einen dezentralen Regelungsansatz zu implementieren und umzusetzen. Für die Auswahl

der geeigneten Demogebäude ist zum einen ein dezentraler Aufbau der Komponenten und Aktoren sowie eine geeignete Kommunikationsstruktur ausschlaggebend. Dies ist besonders bei dem Demogebäude der LMT Group gegeben. Mehrere Verbraucher, in Form von verschiedenen Werkshallen und Verwaltungsgebäuden, und Erzeuger mit 2 Kesselanlagen und eine Wärmerückgewinnung sind räumlich voneinander getrennt und dezentral aufgebaut. Die Sensordaten sind im Netzwerkwerk verfügbar, werden jedoch in der bisherigen Reglerimplementierung nicht verwendet. Für eine neue Reglerimplementierung sollen sie genutzt werden. Eine nähere Beschreibung erfolgt im Abschnitt 9.3.1.

Aktuell gibt es keinen konventionellen Regler, der als Rückfallebene genutzt werden kann, es besteht keine übergeordnete Regelung, die die einzelnen Erzeuger zentral regelt. Der Betrieb erfolgt aktuell mit manuellen Eingriffen. Daher wurde ein Regelkonzept erarbeitet und für die Implementierung vorgeschlagen. Dieses ist in Abschnitt 9.3.2 beschrieben.

Ein ähnlicher Aufbau besteht bei der Schule Mendelssohnstraße. Eine Kesselanlage versorgt mehrere Verbraucher, die alle ihre eigenen Aktoren haben. Zudem ist ein Speicher verfügbar. Ein dezentraler Regleraufbau ist somit möglich. Eine geeignete Kommunikationsstruktur ist durch die Anbindung der Sensor- und Aktorsignale an eine Automationsstation auch gegeben. Das Regelungskonzept für die Schule Mendelssohnstraße ist in Kapitel 9.3.3, der implementierte konventionelle Regler in Kapitel 9.3.4 beschrieben.

Diese beiden Demonstrationsgebäude erfüllen die Anforderungen an die dezentrale Netzwerkregelung am besten. Zudem zeigen sie das Potenzial bei der Verwendung der dezentralen Regelung eine Verbesserung gegenüber den bisherigen Regelungen zu erzielen. Dies ist bei den anderen Demogebäuden in der Form nicht gegeben.

9.3.1 LMT Group Schwarzenbek (HAW)

In der Anlage der LMT Group in Schwarzenbek treten gerade in der Winterzeit Versorgungsprobleme auf. Somit ist das Ziel der Regelung zum einen die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Dazu stehen in der Anlage drei Wärmeerzeuger zur Verfügung - zwei Kesselanlagen sowie eine Wärmerückgewinnung (WRG) von Druckluftkompressoren. Um den Betrieb energieeffizient zu gestalten, sollte die WRG möglichst immer genutzt werden. Verbraucher setzen sich aus einem Verwaltungsgebäude und mehreren Werkshallen in Form von Lüftungsanlagen, Warmwasserbereitung und statischen Heizungen zusammen. Reicht die WRG nicht aus um die Wärmeversorgung sicherzustellen, sollen die Kesselanlagen hinzugeschaltet werden, je nachdem wieviel Wärme benötigt wird. Dabei ist zu beachten, dass möglichst wenig zwischen den verschiedenen Energieerzeugern geschaltet wird.

Ein Basisregelkonzept dazu wurde sowohl von der Plenum Ingenieurgesellschaft als auch von Honeywell auf Anfrage der LMT Group erstellt. Beide Konzepte basierten zunächst darauf die Hydraulik in der Anlage zu verbessern. Hier bestanden große Probleme an mehreren Stellen in der Anlage. Eine funktionierende Hydraulik ist eine Grundlage für den erfolgreichen Einsatz eines neuen Reglerkonzeptes. Ohne funktionierende Hydraulik kann auch der neue Regler keine guten Ergebnisse liefern. Daher sind diese Arbeiten eine Voraussetzung für den Einsatz eines Reglerdemonstrators. Das konventionelle Regelkonzept soll dann als Rückfallebene für die Anwendung des

Reglers auf dem Echtzeitsystem dienen. Für den Reglerdemonstrator soll ein prädiktive Regelungsansatz gewählt werden. Dabei sollen mehrere dezentrale prädiktive Reglerknoten umgesetzt werden. Ein Einsatz des Demonstrators an der Erzeugerseite wäre bei dieser Anlage nach Einschätzung von Honeywell mit einem hohen Risiko und vielen Unsicherheiten, besonders bezüglich der Hydraulik, verbunden. Um somit bei einem Fehlverhalten, nicht das Risiko der Unterversorgung des gesamten Werkes zu haben, wurde geplant den Demonstrator zunächst in einzelnen Heizkreisen einzusetzen. Um zunächst erste Tests an einem kleinen Teilsystem durchführen zu können, sollte ein Reglerknoten für einen einzelnen geeigneten Heizkreis mit weniger problematischer Hydraulik entworfen werden. Dieser Reglerknoten soll die Sollvorlauftemperatur des Heizkreises sowie das Stellsignal der Heizkreis-Pumpe bereitstellen. Dazu sind verschiedene Messsignale aus der Anlage notwendig, wie die Vor- und Rücklauf-temperatur, der Volumenstrom oder die Hallentemperatur. Für die prädiktive Regelung soll auch die Wettervorhersage mit einbezogen werden. Damit ergibt sich für den geschlossenen Regelkreis eines Heizkreises das in Abbildung 9.3-3 gezeigte Schema.

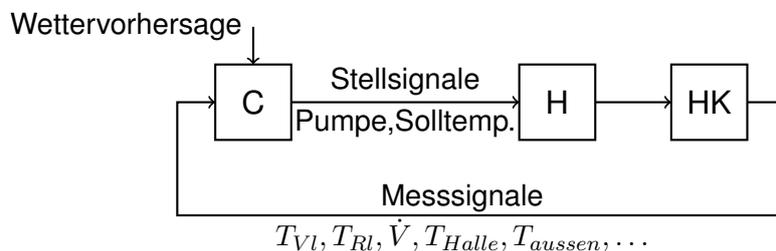


Abbildung 9.3-3: Regelkreis eines Heizkreises (C: Regler, H: Honeywell Automationsstation, HK: Heizkreis)

Dieser Regleransatz kann daraufhin von einem auf mehrere Heizkreise erweitert werden, indem auch weitere Heizkreise mit solchen prädiktiven Reglerknoten ausgestattet werden, die dann unabhängig voneinander in den Heizkreisen arbeiten. Dabei sind verschiedene Arten der Umsetzungen möglich. Zum einen könnten die Demonstratoren auf verschiedenen Echtzeitsystemen implementiert werden und jeweils über eine Automationsstation angebunden werden, wie in Abbildung 9.3-4a gezeigt.

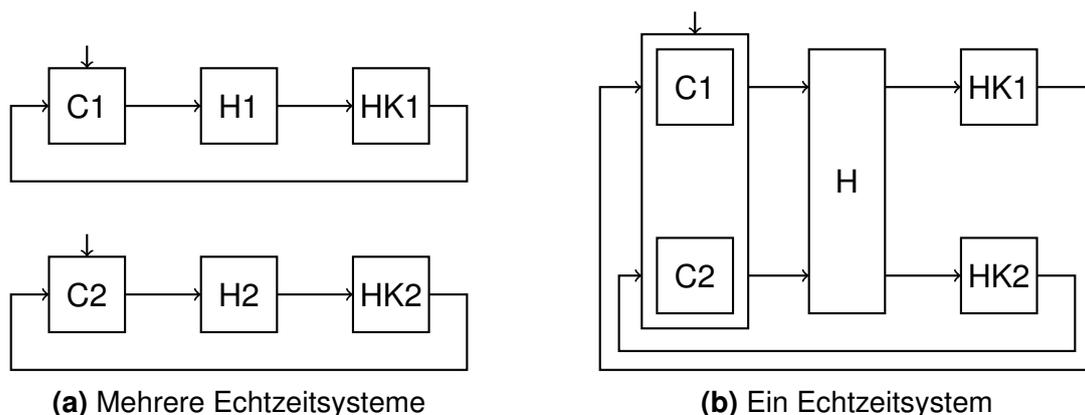


Abbildung 9.3-4: Möglichkeiten der Implementierung (C: Regler, H: Honeywell Automationsstation, HK: Heizkreis)

Die Abbildung 9.3-4b zeigt die zweite Möglichkeit der Anbindung über eine zentrale

Automationsstation. Die Regler der einzelnen Heizkreise wären dann auf einem Echtzeitsystem implementiert und die Dezentralität simuliert, d.h. die einzelnen Regler bekommen nicht den Zugriff auf die kompletten Signale, sondern nur auf eine Teilmenge. Für das Konzept der dezentralen Regelung sind somit mindestens 2 Heizkreise nötig. Wenn sich dieses Konzept für die Heizkreise bewährt, ergäbe sich die Möglichkeit diesen Ansatz auch auf die Erzeugerseite zu erweitern. Aufgrund des Einsatzes von prädiktiven Konzepten auf der Verbraucherseite, ist es möglich das Verhalten der einzelnen Heizkreise, d.h. der Verbraucher, für die Zukunft vorherzusagen. Diese Verbrauchsvorhersage aus den Heizkreisen kann dann für das Zu- und Abschalten der Heizzentralen, z.B. für das Zuschalten der Heizzentrale 2 genutzt werden. Mögliche Forschungsfragen wären hier, ob sich bereits aus Informationen von wenigen Verbrauchern die aktuelle Schaltentscheidung verbessern lässt und welche Verbraucher dazu auszuwählen wären. Ein minimaler Aufbau dazu ist in Abbildung 9.3-5 gezeigt.

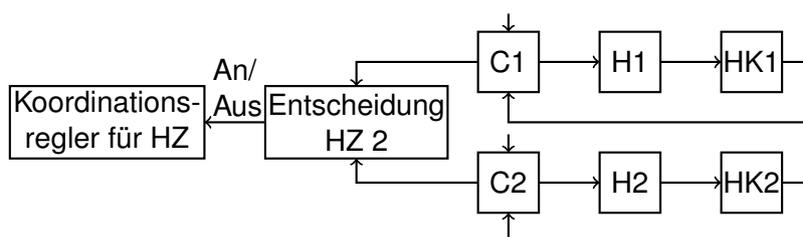


Abbildung 9.3-5: Anbindung der Erzeuger an die Verbraucherregler

Das von Seiten der HAW entwickelte Regelkonzept erfordert wie oben beschrieben die Ansteuerung der Aktoren über eine Automationsstation sowie die Bereitstellung einer Schnittstelle zur Automationsstation. Dazu kam es unter anderem am 20. Juli 2016 zu einem Treffen mit Honeywell und am 13. Oktober 2016 zu einem Treffen mit der LMT Group, um das Regelungskonzept sowie die Anforderungen an die Schnittstelle zu besprechen. Sowohl die Plenum Ingenieurgesellschaft als auch Honeywell entwickelten ein Basisregelkonzept. Das Unternehmen LMT Group entschied sich für das Regelungskonzept von Honeywell.

Nach dieser Entscheidung wurde gemeinsam mit Honeywell und der LMT Group das Konzept zur Umsetzung des Forschungsvorhabens mit dezentralen prädiktiven Reglern weiterentwickelt. Die für die Umsetzung und Implementierung notwendigen Anforderungen, d.h. die Bereitstellung von Messdaten sowie eine Schnittstelle zu der Automationsstation oder den Automationsstationen konnten von deren Seite jedoch nicht erfüllt werden, sodass die darauf aufbauende Reglerentwicklung und -implementierung nicht erfolgen konnte. Trotz mehrmaliger Interessensbekundungen von Seiten Honeywells und der LMT Group an der Mitwirkung an dem Forschungsvorhaben, wurden die Voraussetzungen an der Anlage nicht geschaffen. Die Auslastung zu der Zeit bei der LMT Group war sehr groß, da viele Projekte in der Gebäudetechnik des Werks in Bearbeitung waren. Das Interesse des Gebäudebetreibers lag mehr an einer Sicherstellung der Versorgung, welche von Honeywell sichergestellt werden soll, als an einem optimierten energieeffizienten Betrieb. Die Anreize eines temporären Reglerdemonstrators an der Anlage waren somit nicht ausreichend.

9.3.2 Konventioneller Regler LMT Group Schwarzenbek

Im Betrieb der Heizungsanlage kommt zu Beschwerden über mangelhafte Versorgung einzelner Bereiche. Die Anlage wird im Arbeitspaket 2 - Betreuung der Demonstrationsgebäude, Datenabruf und Aufbereitung - näher beschrieben; dort wird auch ein Anlagenschema gezeigt. Um eine Versorgung zu gewährleisten, wird die Ringleitung zeitweise manuell unterbrochen und die Gaskessel werden manuell ein- bzw. ausgeschaltet. Die Messdaten des Winters 2015/2016 und die zur Verfügung stehende Anlagendokumentation wurden auf Fehler und Optimierungspotential untersucht. Dabei konnte folgendes festgestellt werden:

- die angebotenen Komponenten in der Heizzentrale 1 können bei korrekter Parametrierung, welche derzeit nicht gegeben ist, für eine ausreichende Vorlauftemperatur sorgen,
- mit den für Heizzentrale 1 angebotenen Komponenten kann, bei der derzeitigen Einbindung, kein Brennwertnutzen erreicht werden,
- die verbauten Komponenten in der Heizzentrale 2 können laut Auskunft von Buderus - bei korrekter Parametrierung - für eine ausreichende Vorlauftemperatur sorgen,
- mit den in Heizzentrale 2 verbauten Komponenten kann laut Auskunft von Buderus ein Brennwertnutzen erreicht werden, dieser wird vermutlich aber nicht erreicht (ohne Messwerte auf Primärseite ist dieses nicht abschließend prüfbar),
- die Betriebsdaten zeigen, dass in beiden Heizzentralen die Parametrierung nicht in Ordnung ist,
- die Einspeisepumpen in der Heizzentrale 1 werden mit konstanter Leistung betrieben, es scheint einen Fehler in der Hydraulik zu geben und
- eine Abstimmung zwischen den möglichen Einspeisepunkten hinsichtlich einer Optimierung der Druckverteilung im Netz findet nicht statt.

Eine übergeordnete Regelung ermöglicht die Abstimmung der Wärmeerzeuger und Einspeisepumpen. Die oben genannten Probleme können damit behoben werden und es ergeben sich folgende Vorteile:

- Nutzung des Brennwerteffekts (im Rahmen der erreichbaren Rücklauftemperaturen),
- verringerter Stromverbrauch der Pumpen,
- geringere Starthäufigkeit der Wärmeerzeuger und
- verringerter Aufwand für manuelle Eingriffe.

Damit eine übergeordnete Regelung funktionieren kann, müssen folgende Grundvoraussetzungen geschaffen werden:

- die Komponenten müssen ansteuerbar sein, Schnittstellen müssen nachgerüstet werden,

- Messtechnik muss nachgerüstet werden und
- die Verbraucher müssen in einem akzeptablen Zustand sein, es dürfen keine größeren Bypässe vorhanden sein.

Die Wärmeerzeugung und die Einspeisepumpen sollen so geregelt werden, dass kein manuelles An- bzw. Abschalten von Kesseln oder manuelle Leistungsänderung der Einspeisepumpen notwendig ist. Es soll ein stabiler Betrieb erreicht werden, der die Anlage ausreichend versorgt. Es kann an drei verschiedenen Stellen der Ringleitung Wärme eingespeist werden:

- **Kompressorabwärme**
Dieser Bereich soll unabhängig von der übrigen Regelung möglichst viel Wärme ins Netz einspeisen. Die bestehende Regelung wird nicht verändert. Die Parameter werden optimiert.
- **Heizzentrale 1**
Die Kessel in der Verwaltung sollen die Hauptversorgung übernehmen. Es sollen lange Kesselaufzeiten erreicht und Rücklaufanhebungen über die Hydraulische Weiche vermieden werden. Die aktuelle Regelung hat keine ausreichende Funktionalität, es muss eine neue Kesselfolgeschaltung implementiert werden.
- **Heizzentrale 2**
Der Kessel in Halle 6 wird hinzugeschaltet, wenn die Wassermenge in der Heizzentrale 1 zu groß wird. Die bestehende Regelung soll weiterverwendet und optimal parametrisiert werden.

Im folgenden werden für die drei Erzeuger die Ein- und Ausgangsgrößen sowie die Regelstrategie genannt.

9.3.2.1 Nutzung der Kompressorabwärme

Die bestehende Regelung soll weiterverwendet werden, eine Vernetzung mit einem globalen Regler ist nicht notwendig. Es wird mit konstanter Sollvorlauftemperatur eingespeist.

9.3.2.2 Heizzentrale 1 (Verwaltung)

Pumpen

Eingangsgrößen

- Volumenstrom (hydraulische Weiche sekundär, d.h. zwischen hydr. Weiche und Verteiler), Analogwerte des Volumenstroms aus dem Wärmemengenzähler

Ausgangsgrößen

- Hauptpumpe 1/2 an / aus
- Drehzahl

Einstellparameter

- Kennlinie 1 (Minimaldrehzahl, Maximaldrehzahl, Rampe)
- Kennlinie 2 (Minimaldrehzahl, Maximaldrehzahl, Rampe)
- Umschaltunkte zwischen 1 und 2 Pumpen

Die Pumpen werden nach dem Volumenstrom geregelt. Aus niedrigem Volumenstrom folgt eine niedrige Pumpendrehzahl. Die resultierende Kennlinie kann man sich wie eine "Heizkurve umgedreht" vorstellen. Es soll einen wöchentlichen Wechsel der Führungspumpe geben. In diesem Bericht wird davon ausgegangen, dass die Pumpen baugleich sind. Für das Zu- bzw. Abschalten der Pumpen soll der Mittelwert der Volumenstrommessung über einige Minuten gebildet werden, um bei kurzfristigen Schwankungen kein Schalten auszulösen.

Sollvorlauftemperatur

Eingangsgrößen

- Außentemperatur

Ausgangsgrößen

- Sollvorlauftemperatur

Einstellparameter

- Heizkurve

Die Sollvorlauftemperatur des Verbrauchers (hydr. Weiche sekundär) soll nach Außentemperatur variiert werden.

Kessel

Kesseltemperatur und ggf. Durchfluss sollen so geregelt werden, dass sie den Verbraucher mit gewünschter Temperatur versorgen und dass möglichst keine Rücklaufanhebung über die hydraulische Weiche stattfindet. Lange Laufzeiten sind anzustreben.

Eingangsgrößen

- Volumenstrom sekundär
- Vorlauftemperatur sekundär
- Sollvorlauftemperatur sekundär
- Rücklauftemperatur sekundär
- Volumenstrom primär (analog, magnetisch induktiv)

Ausgangsgrößen

- Kessel an / aus

- Sollwert Kesseltemperatur
- Drehzahl/Leistung Kesselpumpen

Einstellparameter

- Schaltgrenzen Kessel an/aus nach Leistung
- Grenzwerte Kesseltemperatur
- Grenzwerte Leistung Kesselpumpen
- Grenzwerte Volumenstrom Kessel

Aus Volumenstrom, Rücklauftemperatur des Verbrauchers und Sollvorlauftemperatur des Verbrauchers wird die Soll-Leistung der Kessel berechnet. Dieses Signal wird über einige Minuten geglättet. Bei Unter- bzw. Überschreiten von Schwellwerten des Leistungssignals werden Kessel hinzugeschaltet oder abgeschaltet. Die Kesselpumpen sollen so geregelt werden, dass der resultierende Kurzschlussvolumenstrom in der Hydraulischen Weiche möglichst immer 0 ergibt. Die Kesselsolltemperatur entspricht im Regelfall der Solltemperatur des Verbrauchers. Bei 100% Pumpenleistung und zu niedriger Vorlauftemperatur des Verbrauchers (Volumenstrom Verbraucher > Volumenstrom Kessel) soll die Kesselsolltemperatur erhöht werden bis die Verbrauchersolltemperatur oder ein Grenzwert erreicht ist. Die Mindestwassermenge durch die Kessel muss sichergestellt werden. Der Führungskessel wird regelmäßig umgeschaltet. Die Kessel müssen hydraulisch auf die maximale Kesselleistung abgeglichen sein.

9.3.2.3 Folgeschaltung für Heizzentrale 2 (Halle 6)

Eingangsgrößen

- Volumenstrom Einspeisung Heizzentrale 1 (hydraulische Weiche sekundär, d.h. zwischen hydr. Weiche und Verteiler), Analogwerte des Volumenstroms aus dem Wärmemengenzähler

Ausgangsgrößen

- Halle 6 an / aus
- Einspeiseventil offen / geschlossen

Einstellparameter

- Umschaltpunkte bzw. Umschaltpunkt und Hysterese

Bei Überschreiten eines Schwellwertes für den Volumenstrom in der Heizzentrale 1 soll der Kessel in Halle 6 dazu geschaltet werden. Bei Unterschreitung eines 2. Schwellwertes wird er wieder ausgeschaltet. Es soll der über Mittelwert der Volumenstrommessung über einige Minuten gebildet werden, um bei kurzfristigen Schwankungen kein Schalten auszulösen.

9.3.2.4 Heizzentrale 2 (Halle 6)

Folgeschaltung für Heizzentrale 2 (Halle 6)

Der Regler aus der Heizzentrale 1 sendet das Signal, ob die Heizzentrale 2 benötigt wird oder nicht. Wenn die Anforderung aktiv ist, soll die Wärmeerzeugung in Betrieb sein.

Pumpen

Eingangsgrößen

- Signal aus Heizzentrale 1
- Volumenstrom (sekundär, d.h. zwischen Wärmeübertrager und Ringleitung)

Ausgangsgrößen

- Pumpe Halle 6 an / aus

Einstellparameter

- Soll-Differenzdruck
- Mindestvolumenstrom

Bei Anforderung aus Heizzentrale 1 wird die Einspeisepumpe in Heizzentrale 2 aktiviert. Sie soll einen konstanten Differenzdruck bereitstellen. Sollte die Mindest-Wassermenge nicht erreicht werden, soll die Pumpe in der Leistung gesteigert werden bis diese erreicht wird.

Sollvorlauftemperatur

Eingangsgrößen

- Außentemperatur

Ausgangsgrößen

- Sollvorlauftemperatur

Einstellparameter

- Heizkurve

Die Sollvorlauftemperatur des Verbrauchers soll nach Außentemperatur variiert werden.

Kessel

Der Kessel soll so geregelt werden, dass er den Verbraucher mit gewünschter Temperatur versorgt und keine Rücklaufanhebung stattfindet. Die übergeordnete Regelung muss daher nur die Anlage an- bzw. abschalten und die Solltemperatur weitergeben.

Eingangsgrößen

- Signal aus Heizzentrale 1
- Sollvorlauftemperatur

Ausgangsgrößen

- Kessel an/aus

Einstellparameter

- Heizkurve

9.3.3 Schule Mendelssohnstraße (HAW)

Ein weiteres Konzept zur Reglerimplementierung wurde für das Demonstrationsgebäude der Schule Mendelssohnstraße in Hamburg entwickelt. Hierbei handelt es sich um eine Anlage, die mit zwei Heizkesseln vier Verbraucherheizkreise versorgt, wie in Abbildung 9.3-6 dargestellt.

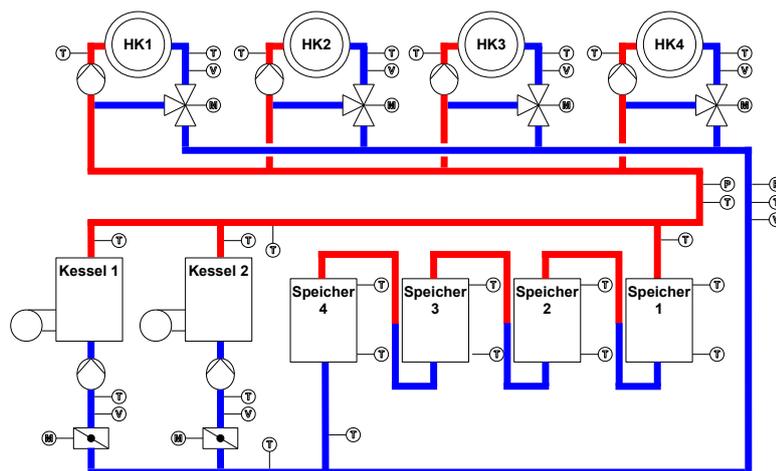


Abbildung 9.3-6: Anlage Mendelssohnstraße

Zudem steht eine Speicherkette mit 4 Komponenten zur Verfügung. In Anlehnung an das Konzept für die LMT Group sollen auch hier dezentrale prädiktive Regler zum Einsatz kommen. Die vier Heizkreise sowie die Kessel erhalten jeweils einen eigenen prädiktiven Reglerknoten, der nur Zugriff auf die Stellsignale der jeweiligen Komponente sowie einen Teil der Messsignale hat. Die Reglerknoten der Heizkreise übernehmen die Regelung der Verbraucher, die über statische Heizungen versorgt werden. In der Aula und der Küche sind zudem Lüftungsanlagen vorhanden. Die Knoten bekommen Zugriff auf das Stellsignal des Mischventils, um eine Sollvorlauftemperatur im jeweiligen Verbraucherkreis einstellen zu können. Zudem kann die Heizkreispumpe an- oder ausgeschaltet werden. Für eine Erweiterung des Ansatzes stünden zudem Klappen für Unterkreise zur Verfügung die geschlossen werden könnten, um so Teile der Verbraucher vom Versorgungsnetz abtrennen zu können. Aus den Verbrauchern müssen den Reglern dazu Messsignale, wie die Vorlauf- und Rücklauftemperatur, die Raumtemperatur, die Außentemperatur und der Volumenstrom zur Verfügung gestellt werden.

Durch den Einsatz von prädiktiven Reglern ist auch hier eine Vorhersage des zukünftigen Verhaltens der Verbraucher möglich. Diese Verbrauchsinformation soll daraufhin in dem Kesselregler genutzt werden, um die Kessel an- oder abzuschalten und die Sollvorlauftemperatur des jeweiligen Kessels zu bestimmen. Dies beinhaltet auch, den Speicher effizient mit einzubinden, der passiv geladen bzw. entladen wird. Auch hier sind aus der Anlage Messsignale notwendig wie die Vor- und Rücklauftemperaturen, den Volumenstrom und die Speichertemperaturen.

Um nicht mehrere Hardwarekomponenten neu an die Anlage anbinden zu müssen, soll auf bestehende Infrastruktur zurückgegriffen werden. Die Messsignale sowie die betrachteten Stellsignale liegen bereits alle zentral auf einer Automationsstation auf. Diese soll daher auch als Schnittstelle zwischen Reglerdemonstrator und Anlage dienen. Die einzelnen Reglerknoten sind damit auf einem Echtzeitsystem implementiert und die Dezentralität wird dadurch simuliert, dass den Reglerknoten intern nur der Zugriff auf eine Teilmenge der Mess- und Stellsignale erlaubt wird. Dies hat den Vorteil, dass nur eine Komponente über die zentrale Automationsstation an die Anlage angebunden werden muss und somit nur eine Schnittstelle und nicht mehrere bereitgestellt werden müssen. Abbildung 9.3-7 zeigt die Anbindung des Echtzeitsystems an die Anlage schematisch.

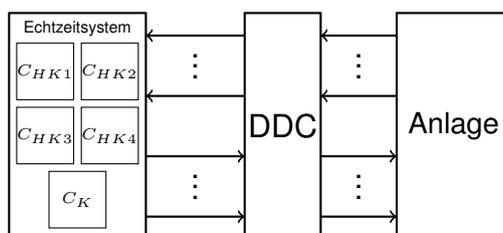


Abbildung 9.3-7: Anbindung des Echtzeitsystems

Auf der Automationsstation ist bereits eine konventionelle Regelung implementiert, die im Falle der Anbindung des Reglerdemonstrators als Rückfallebene dienen soll. Dazu ist auf der Automationsstation eine Überwachung des Echtzeitsystems sowie charakteristischer Anlagenwerte zu implementieren, mit Hilfe derer eine Fehlfunktion des Demonstrators erkannt wird, was daraufhin zu einer Umschaltung auf die konventionelle Regelung führen sollte.

Neben den technischen Herausforderungen der Implementierung, sind diese auch auf der organisatorischen Seite vorhanden. Bei dem hier betrachteten Gebäude ist die Bereitschaft des Gebäudebetreibers nicht sehr hoch die bestehenden Regelkreise der Anlage für ein solches Forschungsvorhaben aufzubrechen. Da keine akuten Probleme in der Anlage bestehen ist der Schritt zu einem energieeffizienten Betrieb aus Sicht der Betreiber nicht mit einer hohen Priorität versehen. Die mit der konventionellen Regelung erreichte Versorgungssicherheit wird als ausreichend angesehen und es ist wenig Interesse vorhanden mit dem vorgestellten temporären Reglerdemonstrator einen Schritt in Richtung des effizienten Betriebes der Anlage zu machen. Zudem ist hier der Punkt der Verantwortlichkeit bei Fehlverhalten des Reglerdemonstrators nicht abschließend geklärt und stellt ein weiteres Problem für eine mögliche Umsetzung dar.

9.3.4 Konventioneller Regler Schule Mendelssohnstraße

In dem bestehenden konventionellen Regler werden die Heizkreise nach Nutzungszeit, Raumtemperatur und Außentemperatur geregelt. Der Absenkbetrieb wird über Abschaltung der Heizkreise umgesetzt, wenn Bereiche unter eine minimale Raumtemperatur fallen, werden sie nachgeheizt. Die Nutzungszeiten sind in Zeitplänen hinterlegt und für jeden Klappenkreis individuell definierbar. Die Regelung der beiden Gaskessel erfolgt nach Solltemperatur der Heizkreise und Speichertemperatur. Der Führungskessel wird angeschaltet, wenn die Speicherkette auskühlt und ausgestellt, wenn die Pufferspeicher voll sind. Der Folgekessel wird hinzugeschaltet, wenn die Leistung des Führungskessels über eine Stunde nicht ausreicht die Sollvorlauftemperatur zu erreichen. Es findet ein wöchentlicher Wechsel des Führungskessels statt. Die Sollvorlauftemperatur wird in Abhängigkeit der Sollwerte der Heizkreise gebildet. Es wurde eine hohe Minimal-Sollvorlauftemperatur eingestellt, damit der Speicher nicht mit kaltem Wasser gefüllt wird wenn alle Heizkreise außer Betrieb sind. Eine Sommerabschaltung der Anlage kann über die Außentemperatur erfolgen.

9.4 LANUV Essen

Im LANUV besteht eine zentrale Wärmeversorgung, welche im Laborgebäude untergebracht ist, durch zwei BHKWs mit einer thermischen Leistung von jeweils 190 kW sowie einem Gaskessel mit einer Leistung von 1.200 kW. Es ist ein Pufferspeicher von 10 m³ Inhalt vorhanden, welcher dazu dient, die Laufzeit der BHKWs und des Gaskessels zu optimieren. Dabei soll die Häufigkeit der Einschaltungen minimiert werden. Die Hydraulik auf der Verbraucherseite ist problematisch, weil es einige unregelmäßige Kurzschlüsse gibt, welche einerseits die Kapazität des Pufferspeichers verringern und bei hohen Vorlauftemperaturen und gleichzeitig geringer Abnahme dazu führen, dass die zulässigen Rücklauftemperaturen für die BHKWs überschritten werden. Außerdem besteht bei einer unregelmäßigen Einspeisung durch den Kessel als Folge eines nicht zu vernachlässigenden Differenzdruckes bei der Beladung des Speichers die Gefahr, dass die BHKWs nicht ausreichend Volumenstrom einspeisen können.

In der Vergangenheit ist es, in Folge einer verkehrten Ansteuerung des Niedertemperaturheizkessels, zu einer Korrosion dieses Kessels gekommen, welche einen vollständigen Ersatz erforderlich machte.

9.4.1 Fehler

In Tabelle 9.4-1 sind relevante, während der Projektlaufzeit im LANUV Essen gefunden Fehler, aufgelistet.

Zusätzlich wurde für das LANUV Essen die Tabelle 9.4-1 [3] erstellt, in welcher beispielhaft Fehler, welche sich das in Kapitel 9.2 beschriebenen Vorgehen aufdecken lassen, beschrieben sind. In dieser Tabelle werden 19 verschiedene Fehler aufgelistet. Ihnen zugeordnet sind die zur Erkennung benötigten Datenpunkte sowie Beispielzeiträume, in denen der Fehler auftritt.

Tabelle 9.4-1: Relevante Fehler im LANUV Essen

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
1	Ausfall Temperatursensor: Temperaturfühler Speicher 1 oben scheint zu viel anzuzeigen	Trenddaten - Plenum Monitor	Reparatur Sensor	behoben
2	Pufferspeicher bei Wartung hydraulisch abgesperrt und nicht wieder geöffnet	Monitoring	Ventile öffnen	behoben
3	Drucksensoren auf dem Verteiler ausgefallen	Trenddaten - Grenzwertüberprüfung	Reparatur Sensor	gemeldet
4	Handbetrieb Brennerfreigabe: Brenner freigegeben obwohl nicht angefordert	Trenddaten	Handbetrieb rückgängig machen	behoben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
5	Wasserverbrauch: knapp 24h durchgehender Verbrauch WWB Allgemein	Trenddaten - Analyse Anlagenbetrieb	Hahn / Leck schliessen	behoben
6	Zulufttemperatur RLT Labor: zu geringe Lufttemperatur, zu wenig Zuluft	Nutzerhinweis		
7	Zu- und Ablufttemperatur RFÜ: Zu- und Ablufttemperatur zu hoch, vermutl. Defekte Komponenten	Trenddaten - Grenzwertüberprüfung	Reparatur	gemeldet
8	BHKW fallen wg. Rückleistung aus	Nutzerhinweis	unbekannt	behoben
9	3-Wege-Ventil Handbetrieb: Mischventil des Verbraucherkreis auf Hand-Offen, Vorlauftemperatur ungeregelt, durch viele Bypässe Rücklaufanhebung, Probleme mit dem BHKW	Schaubild GLT	Umstellung auf Automatikbetrieb	behoben
10	Ausfall WWB Labor: Temperaturfühler im WW-Speicher oben gibt konstanten Wert von 60 °C aus, obwohl Speicher ausgekühlt, Grund: falsche Verknüpfung	Schaubild GLT	Reparatur: Verknüpfung korrigieren	behoben
11	Unterversorgung: Lüftungsanlagen bekommen nicht genug warmes Wasser, Zulufttemperatur bricht ein, Ursache: hoher Volumenstrom durch Speicher, zu großer Widerstand, hydraulisch schlecht angebunden	Trenddaten	Korrektur Betriebsweise Wärmeerzeugung	gemeldet
12	Übertemperatur: BHKWs bekommen zu heißen Rücklauf und gehen dadurch in Störung. Ursache: Kurzschluss über fehlerhafte Regelung im WWB	Nutzerhinweis - Rückmeldung Nutzer / Schaubild GLT	Reparatur	behoben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
13	Probleme bei der Erfassung vom Volumenstrom: a) Volumenstromsonde ausgefallen b) Volumenstromsonde gibt nur konstanten Wert zurück c) Volumenstromsonde gibt nicht den richtigen Wert zurück: Speicher wird geladen, Volumenstromsonde zeigt entladen an d) Bypass parallel zur Sonde geöffnet	Trenddaten / Vor-Ort-Termin	Reparatur / Hydraulik	behoben
14	Hydraulischer Abgleich: Gesamtrücklauftemperatur sehr hoch, teilw. über der für BHKWs erlaubten Temperatur	Trenddaten - TRL	Beseitigung Bypässe, Senkung der Vorlauf-temperatur (u.a. durch Umstellung auf elektrische WWB in der Kantine)	teilweise behoben, teils unverändert

Tabelle 9.4-2: Fehlerliste für regelbasierte Fehlererkennung. Die Zuordnung der Datenpunkte zum Anlagenschema ist im Anhang A gegeben.

F	Fehler	Datenpunkte	Zeitpunkt
Erzeugung			
01	Fehlfunktion Regelventil Kessel	30, 134, 298	z.B. Dezember 2016
02	Laufzeiten BHKW und Kessel	30, 104, 124	z.B. November 2012
03	Laufzeiten BHKW	104, 124	1.9.2014
04	Rücklauftemperaturen zu hoch für BHKW	96, 154	z.B. Mai 2015
05	Leistung Gaskessel	27, 106, 298	z.B. Dezember 2016
06	Ausfall BHKW 2	104	ab 9.12.2016
Verteilung			
07	Mischventil Verbraucher Handbetrieb	189,309,316,321 213	09.08.2016
08	Mischventil Verbraucher ausgefallen	189,309,316,321 213	20.11. - 8.12. 2015

F	Fehler	Datenpunkte	Zeitpunkt
09	Pufferspeicher abgesperrt	z.B. 58, 97, 311, 323	18.4. - 21.4. 2016
10	Rücklauftemperaturen sehr hoch / hydraulischer Abgleich	316, 322, 305, ...	z.B. Juli 2016
11	Heizkurve nicht nach aktueller Außentemperatur	57, 213	z.B. Dezember 2016
Nutzung			
12	Nutzung WW (24h Verbrauch)	195,198,199,230	01. 12. / 02.12.2016
13	(Zu- und Abluft RFÜ)	119, 138	Winter 16/17
MSR			
14	Sonne auf Außentempersensor	57, 101, 324	Juli 2016
15	Wackelkontakt Temperatursensor Speicher 1	52, 63, 103	Mai 2016
16	Ausfall Volumenstromwert Verbraucher	297	z.B. November 2016
17	Ausfall Volumenstromwert Kessel	30, 298	z.B. Dezember 2016
18	Datenausfall	alle	August 2016
19	Datenausfall	Bereich Wärmeezeugung	Anfang November 2016

Im folgenden werden die Fehler aus Tabelle 9.4-1 sowie deren Erkennung beschrieben.

F01

Abbildung 9.4-1: Das Ventil zum Absperrern und Regeln des Kesselvolumenstroms schliesst nicht richtig, wenn der Kessel außer Betrieb ist. Somit wird der Kessel im ausgeschalteten Zustand durchströmt und stellt einen hydraulischen Kurzschluss dar. Die Vorlauftemperatur wird abgesenkt und es kann zu Versorgungsmängeln kommen. Die Ursache ist ein Defekt am Ventil, eine Reparatur behebt das Problem. Bei der regelbasierten Prüfung kann geprüft werden, ob der Kesselvolumenstrom außerhalb der Betriebszeiten auf einen Wert nahe 0 zurückgeht. Desweiteren ist der Fehler F17 in dieser Grafik enthalten.

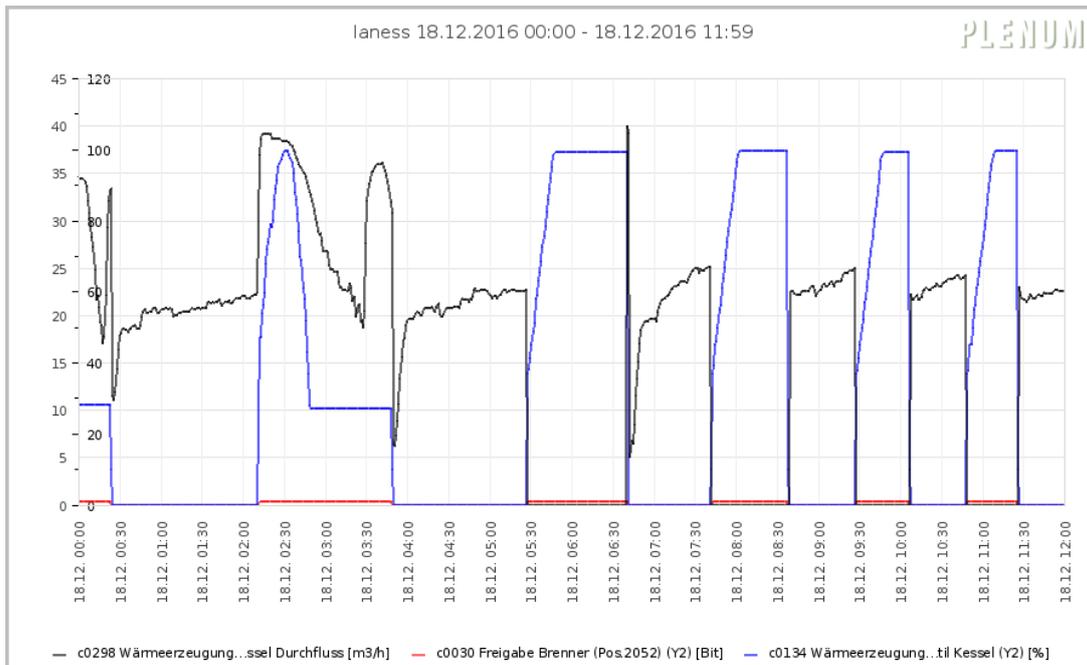


Abbildung 9.4-1: Fehlfunktion Regelventil Kessel

F02

Eine ungeeignete Regelstrategie, beschrieben in [2], sorgte für kurze Laufzeiten beim BHKW und Kessel. Der Pufferspeicher wurde für den Kessel nicht verwendet. Dieser Fehler hatte als Auswirkung, dass der Gaskessel ersetzt werden musste, da er durch Kondensatanfall beschädigt wurde. Die kurzen Laufzeiten, siehe Abbildung 9.4-2, können über die Prüfung der Starthäufigkeit gegen einen Grenzwert erkannt werden. Ebenso sollte der Abstand zwischen Stopp- und Startvorgang überwacht werden.

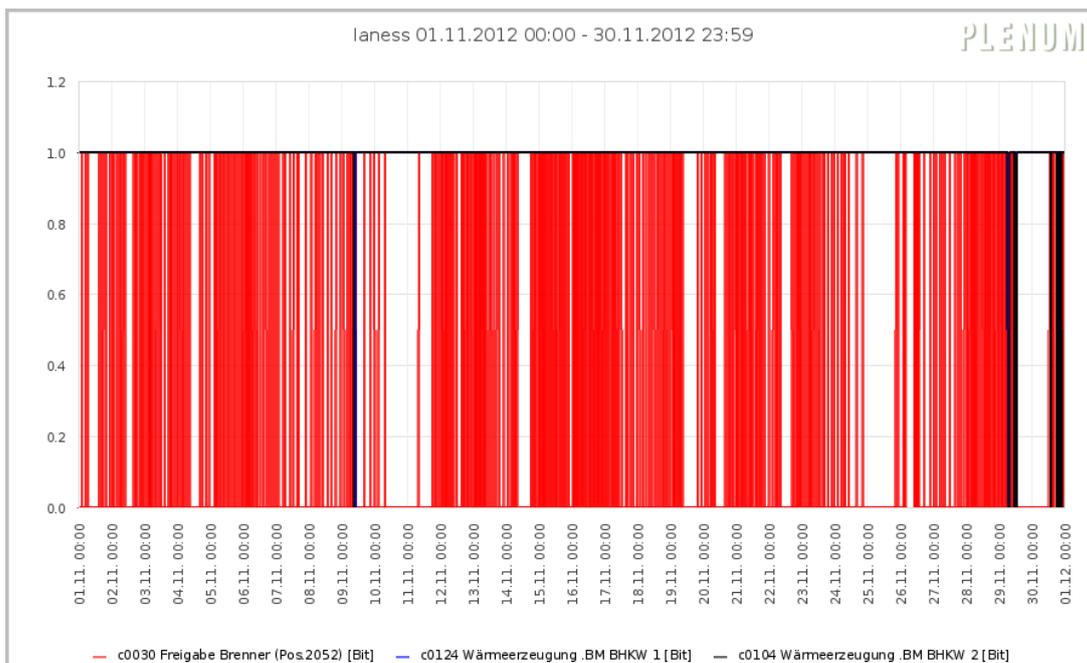


Abbildung 9.4-2: Laufzeiten BHKW und Kessel

F03

Während Wartungsarbeiten wurde die Einschaltreihenfolge der BHKWs vertauscht, siehe Abbildung 9.4-3 (links ist die korrekte Reihenfolge abgebildet und rechts die fehlerhafte). Es wurde erst das 2. und dann das 1. BHKW eingeschaltet. Dadurch kam es zu vermehrten Startvorgängen der BHKWs, siehe Abbildung 9.4-4. Die verkürzten Laufzeiten können über die Prüfung der Starthäufigkeit gegen einen Grenzwert erkannt werden. Ebenso sollte der Abstand zwischen Stopp- und Startvorgang überwacht werden.

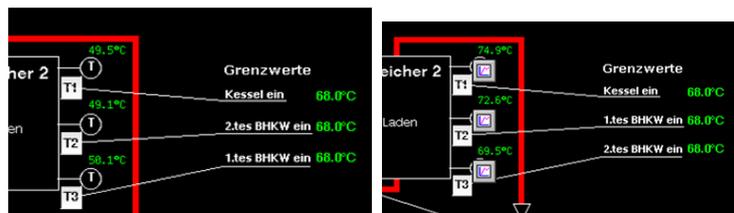


Abbildung 9.4-3: Startbedingungen Wärmeerzeuger

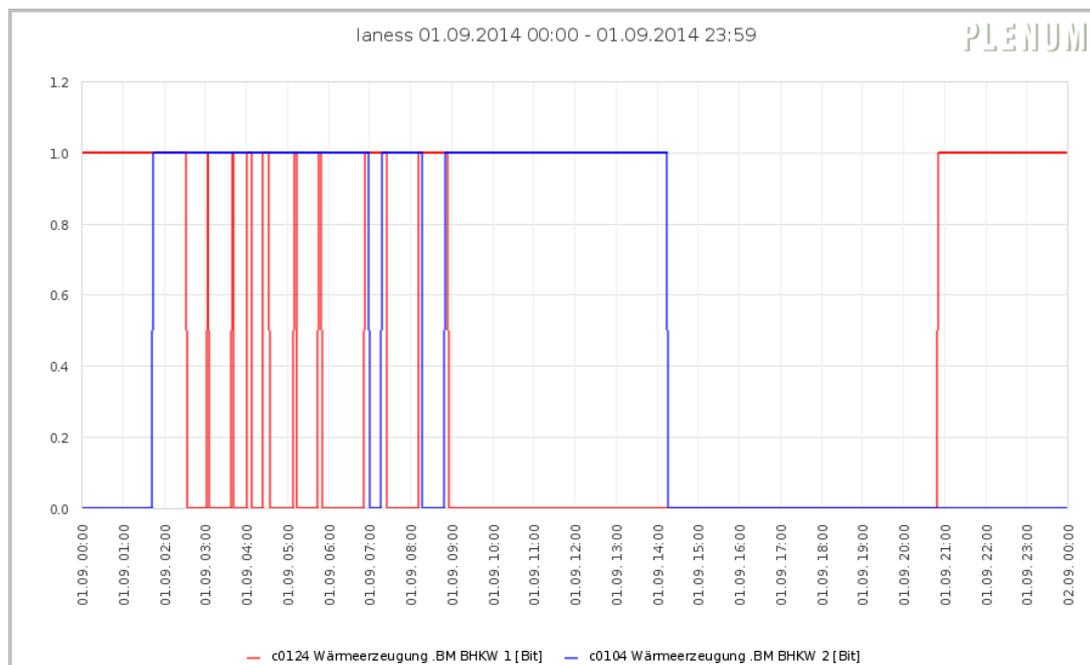


Abbildung 9.4-4: Laufzeiten BHKW

F04

Durch die Überprüfung der Rücklauftemperaturen auf einen Grenzwert konnten Betriebszustände identifiziert werden, bei denen die Rücklauftemperatur zu hoch für einen angemessenen BHKW-Betrieb waren, siehe Abbildung 9.4-5. Es kam zu temperaturbedingten Notabschaltungen der BHKWs. Als Ursache konnte ein hydraulischer Kurzschluss durch eine fehlerhafte Regelung in einem Warmwasserbereiter identifiziert werden.

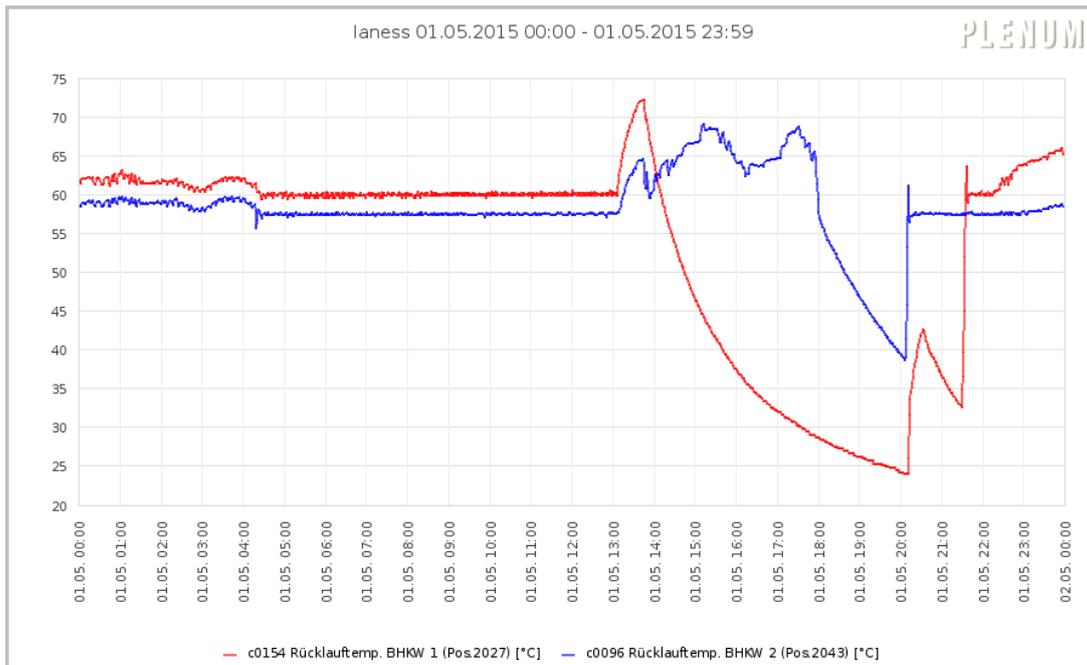


Abbildung 9.4-5: Rücklauftemperaturen BHKW

F05

Bei der Berechnung der Leistung des Gaskessels wurde festgestellt, dass die maximale Leistung nur 700kW erreicht, obwohl in etwa 1,2MW erwartet werden, siehe Abbildung 9.4-6. Verursacht wird dies durch eine mangelhafte Einstellung des Brenners. Erkennbar wird dieser Fehler regelbasiert, wenn die erreichte Kesselleistung gegen den Erwartungswert geprüft wird zu Zeiten, in denen der Gaskessel die gewünschte Vorlauftemperatur nicht erreicht. So können Zeiträume ausgewählt werden, an denen er auf maximaler Leistung arbeitet und nicht über die Regelung gedrosselt wird.

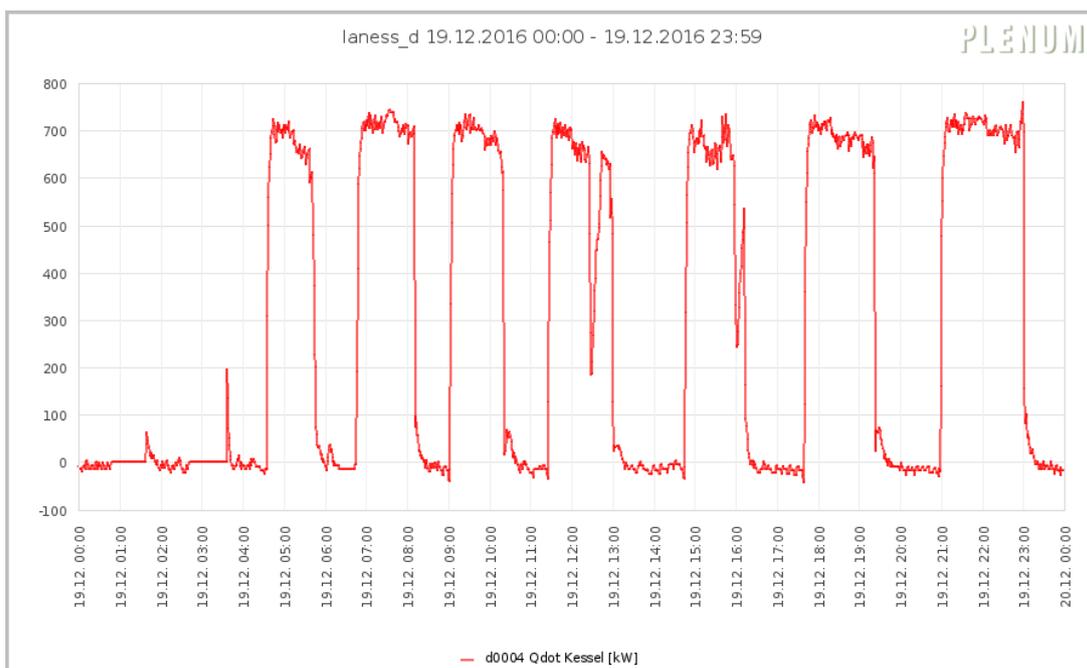


Abbildung 9.4-6: Leistung Gaskessel

F06

Bei einer Wartung wurde ein Defekt im BHKW 2 festgestellt, der eine Deaktivierung notwendig machte. Das Betriebssignal ist in Abbildung 9.4-7 dargestellt. Neben der Störmeldung, die das BHKW ausgibt, ist dieser Fehler anhand eines Vergleichs der Laufzeiten oder Starhäufigkeiten der beiden BHKWs erkennbar. Die Werte beider BHKWs sollten sich in gleicher Größenordnung befinden.

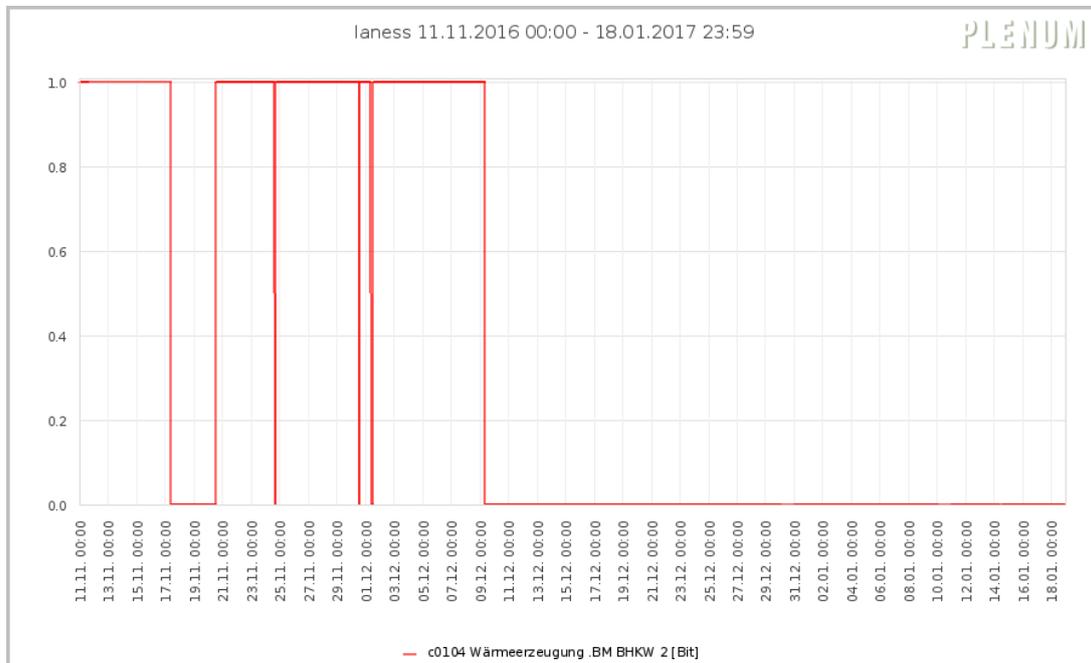


Abbildung 9.4-7: Ausfall BHKW2

F07

Grafik 9.4-8 zeigt die Temperaturdaten und Ventilstellung für das 3-Wege-Ventil des Verbraucherkreises. Die Vorlauftemperatur (Schwarz) sollte der Sollvorlauftemperatur (orange) entsprechen. Zeitweilig wurde das Ventil im Handbetrieb komplett geöffnet und so die Regelung außer Betrieb gesetzt. Über hydraulische Kurzschlüsse gelangte das heiße Wasser aus dem Vorlauf in den Rücklauf und verursachte Probleme im Betrieb der Wärmeerzeuger. Die Reaktivierung des Automatikmodus behob den Fehler. Die Fehlererkennung erfolgt über die Prüfung, ob der Istwert dem Sollwert in etwa entspricht, wenn genügend Temperatur vor dem Ventil verfügbar ist.

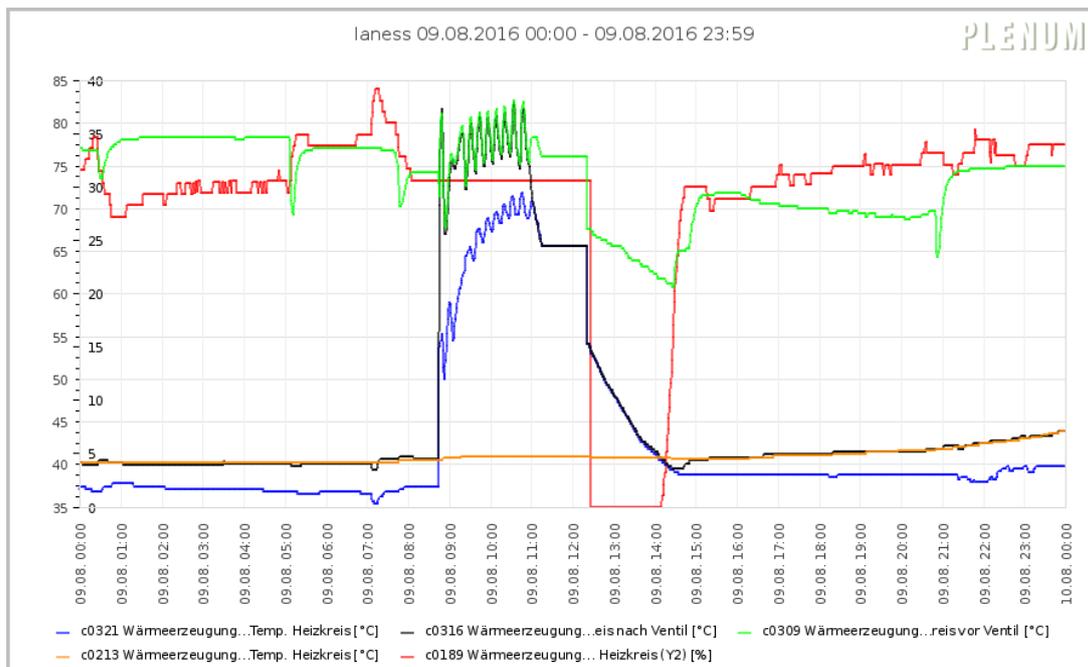


Abbildung 9.4-8: Mischventil Verbraucher im Handbetrieb

F08

Grafik 9.4-8 zeigt die Temperaturdaten und Ventilstellung für das 3-Wege-Ventil des Verbraucherkreises. Die Vorlauftemperatur (Schwarz) sollte der Sollvorlauftemperatur (orange) entsprechen. Zeitweilig wurde das Ventil im Handbetrieb auf einen mittleren Wert eingestellt, da der Antrieb ausgefallen war. Es erfolgte keine Regelung der Vorlauftemperatur im Verbraucherkreis. Die Reparatur des Ventilantriebs behob den Fehler. Die Fehlererkennung erfolgt über die Prüfung, ob der Istwert dem Sollwert in etwa entspricht, wenn genügend Temperatur vor dem Ventil verfügbar ist. Gegen Beginn des betrachteten Zeitraums gab es einen teilweisen Datenausfall, die letzten bekannten Werte wurden weitergeschrieben.

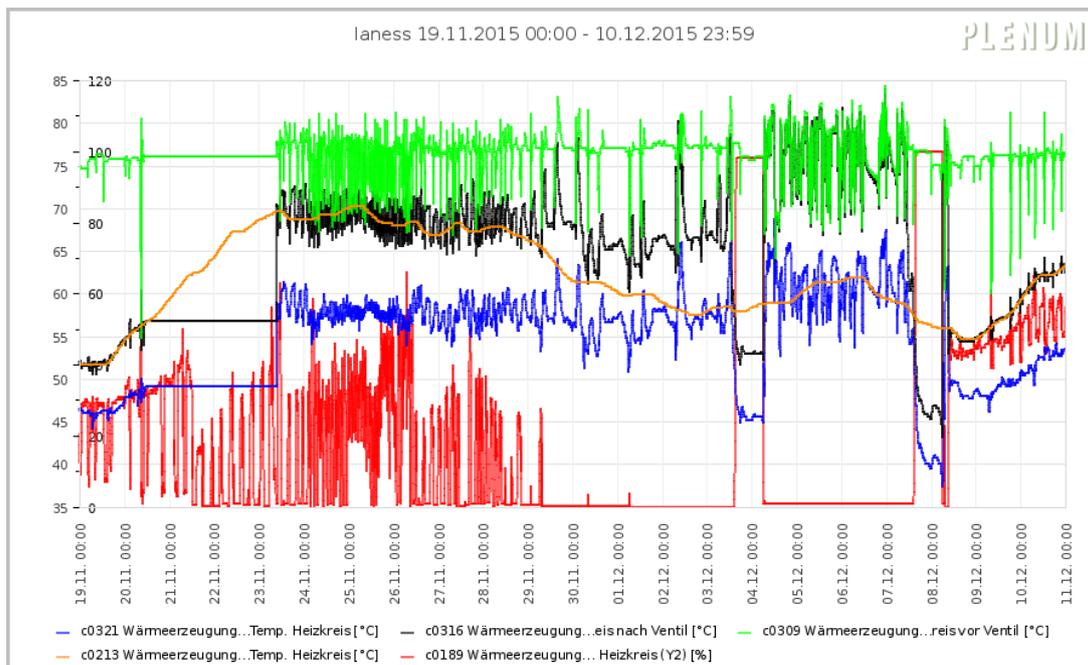


Abbildung 9.4-9: Mischventil Verbraucher ausgefallen

F09

Im Zuge von Wartungsarbeiten wurde der Pufferspeicher hydraulisch abgesperrt. Somit wurde er nicht mehr durchflossen und kühlte aus, siehe Abbildung 9.4-10. Da die Regelung der Wärmeezeuger von der Speichertemperatur abhängig sind, wurden alle Wärmeezeuger in Betrieb gesetzt, obwohl sie nicht benötigt wurden. Eine Möglichkeit, diesen Fehler zu erkennen ist die Prüfung der Wassertemperatur des Pufferspeichers auf der warmen Seite. Diese darf nicht unter einen Grenzwert fallen. Weitere Symptome dieses Fehlers können beispielsweise über die Prüfung der Laufzeiten der Wärmeezeuger erkannt werden.

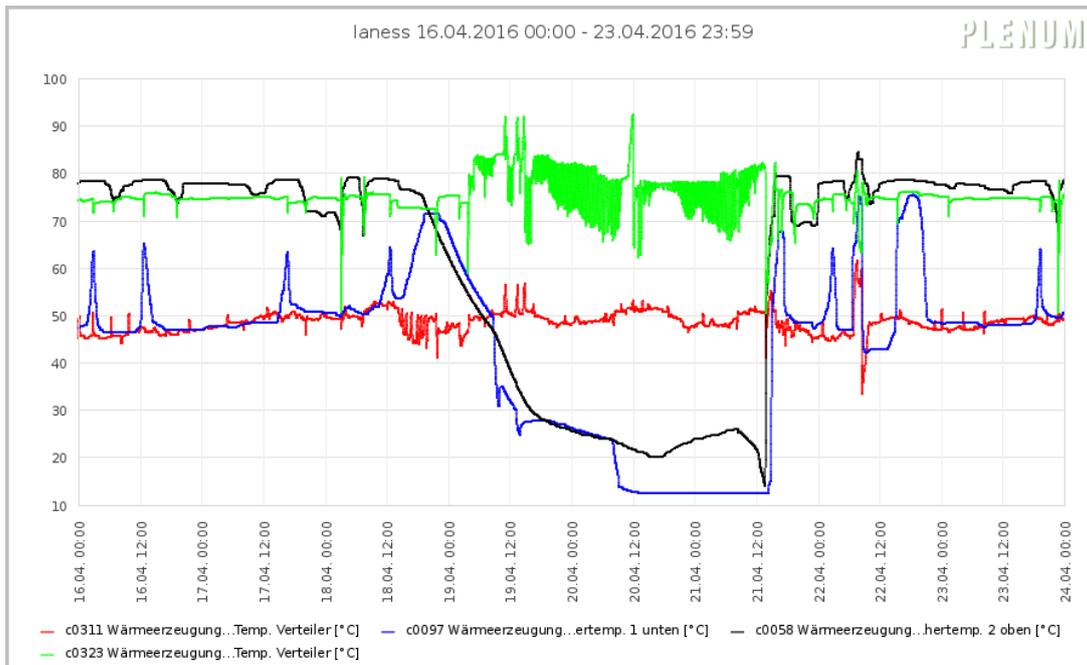


Abbildung 9.4-10: Pufferspeicher abgesperrt

F10

In Abbildung 9.4-11 ist zu erkennen, dass die Rücklauftemperaturen der Heizungsanlage teilweise eine sehr niedrige Temperaturspreizung zur Vorlauftemperatur (schwarz) aufweist. Die Ursache sind Bypässe auf Verbraucherseite, die Auswirkungen sind eine verringerte Kapazität des Pufferspeichers und Probleme beim BHKW-Betrieb. Die Prüfung auf den Fehler kann über die Einhaltung einer Mindest-Temperaturspreizung erfolgen.

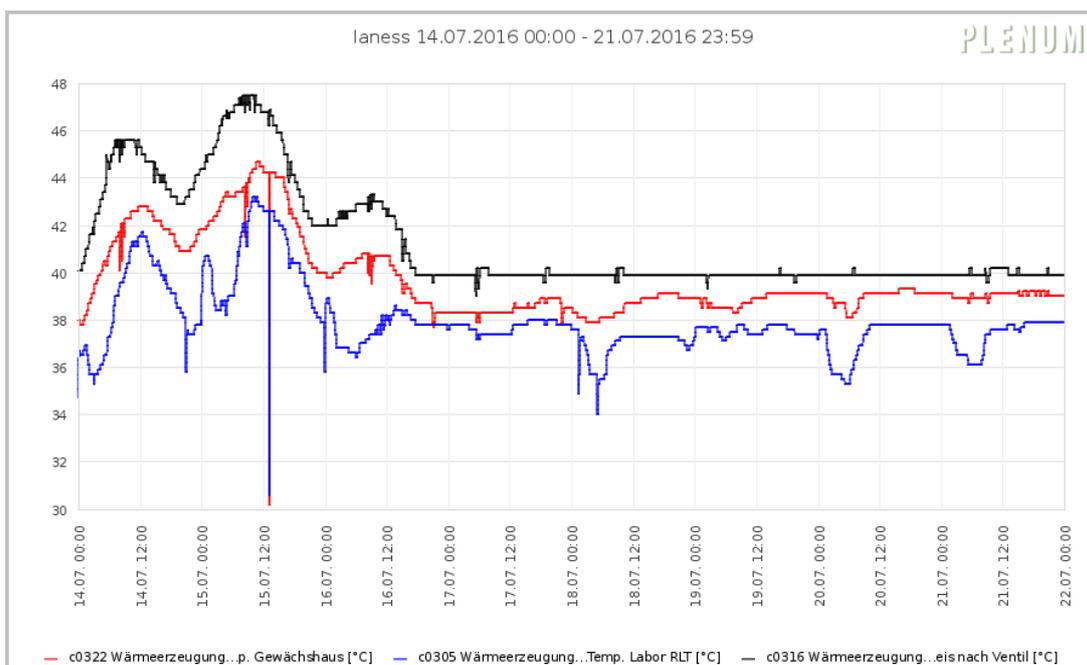


Abbildung 9.4-11: Rücklauftemperaturen sehr hoch

F11

Die Heizkurve des Verbraucherkreises wird nicht nach der aktuellen Außentemperatur berechnet, siehe Abbildung 9.4-12. Somit werden die Verbraucher nicht mit der jeweils gewünschten Temperatur versorgt. Die Erkennung kann über die Korrelation zwischen Außentemperatur und Soll-Vorlauftemperatur erfolgen.

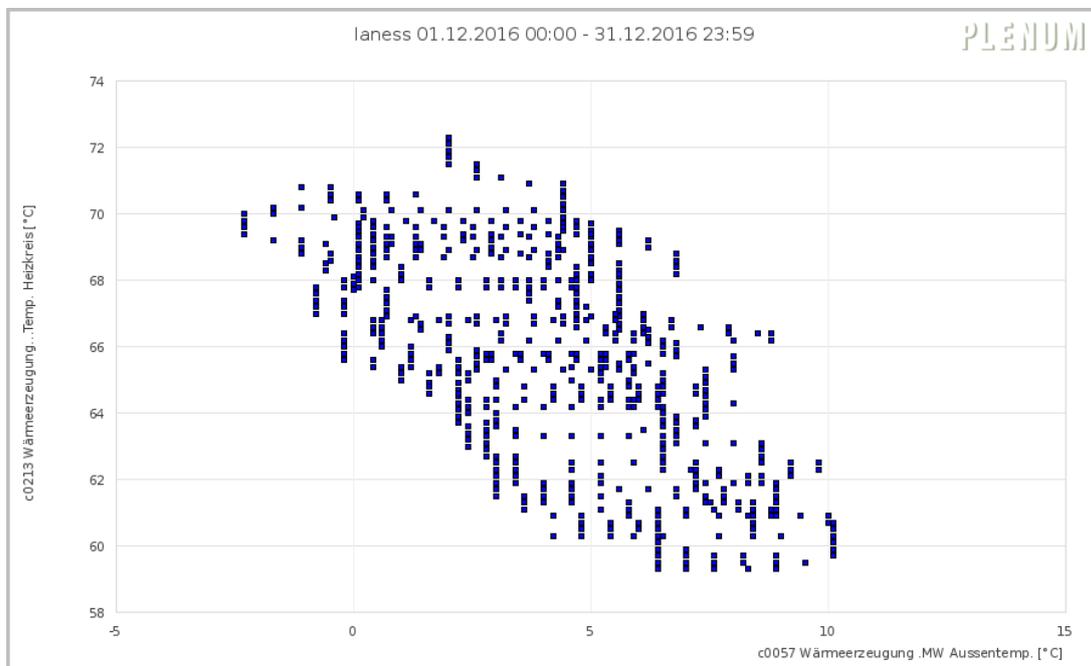


Abbildung 9.4-12: Heizkurve

F12

Bei der Überprüfung der Betriebsdaten wurde ein erhöhter Wasserverbrauch festgestellt, siehe Abbildung 9.4-13. Die Temperaturen im Warmwasserspeicher (grün und schwarz) fielen über Nacht stark ab. Die Temperatur lässt darauf schließen, das kalte Leitungswasser den Speicher durchfließt. Die Ladetemperatur des Speichers ist in Ordnung. Somit besteht ein durchgehender Verbrauch von Warmwasser, die Ursache ist unbekannt. Ein Leck oder geöffneter Wasserhahn sind denkbar. Die Fehlererkennung kann über eine Grenzwertprüfung der Warmwassertemperaturen oder über den Tageswasserverbrauch erfolgen.

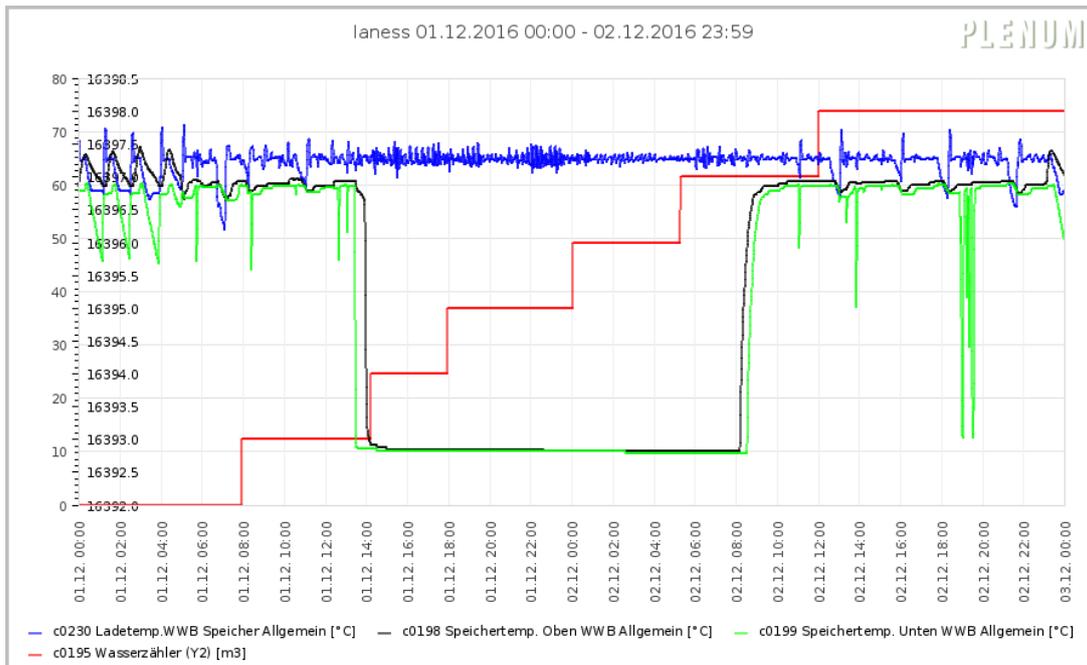


Abbildung 9.4-13: Verbrauch Warmwasser

F13

Die Zu- und Ablufttemperatur einer Lüftungsanlage stiegen mit der Zeit stark an, siehe Abbildung 9.4-14. Als Ursache wird ein Hardwaredefekt vermutet. Die Auswirkungen sind eine stark erhöhte Raumtemperatur und ein gesteigener Energieverbrauch. Der Fehler kann mit einer einfachen Grenzwertprüfung erkannt werden.

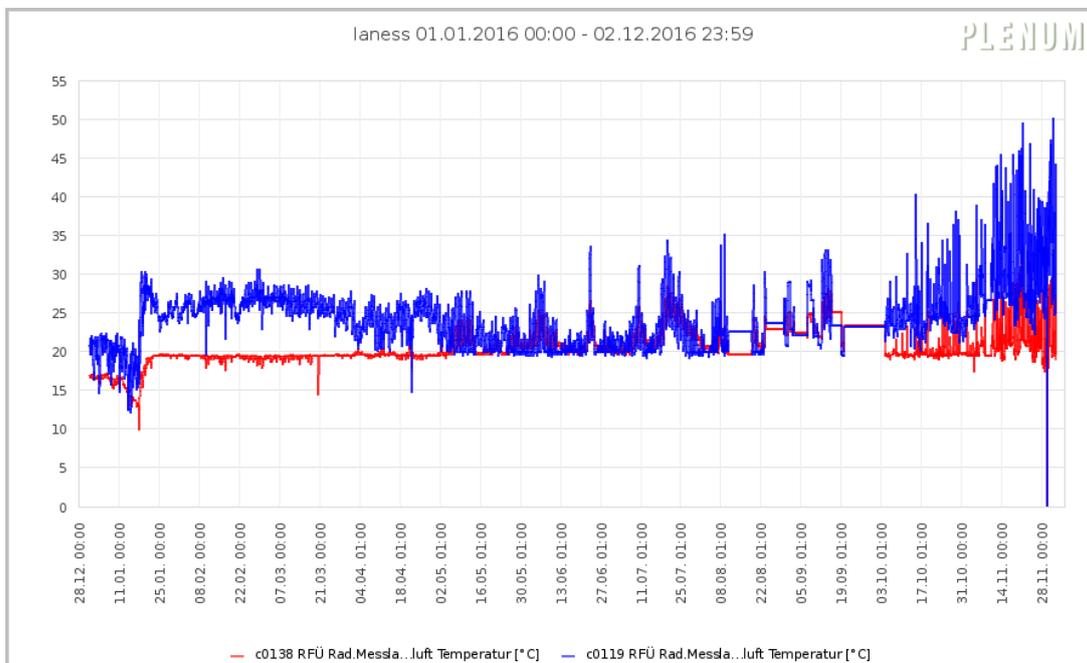


Abbildung 9.4-14: Zu- und Ablufttemperatur

F14

Ein Vergleich verschiedener Außentemperatursensoren zeigt Unterschiede von bis zu 20K, siehe Abbildung 9.4-15. Die Ursache ist direkte Sonneneinstrahlung auf den Sensor der Heizungsanlage (blau). Dadurch stimmt die Heizkurve nicht mit den tatsächlichen Außentemperaturen überein und es kommt tendenziell zu einer Unterversorgung. Durch versetzen des Fühlers oder eine Abdeckung kann das Problem behoben werden. Die Fehlererkennung kann über einen Vergleich verschiedener gemessener Außentemperaturen erfolgen, bei zu großer Abweichung wird ein Fehler gemeldet.

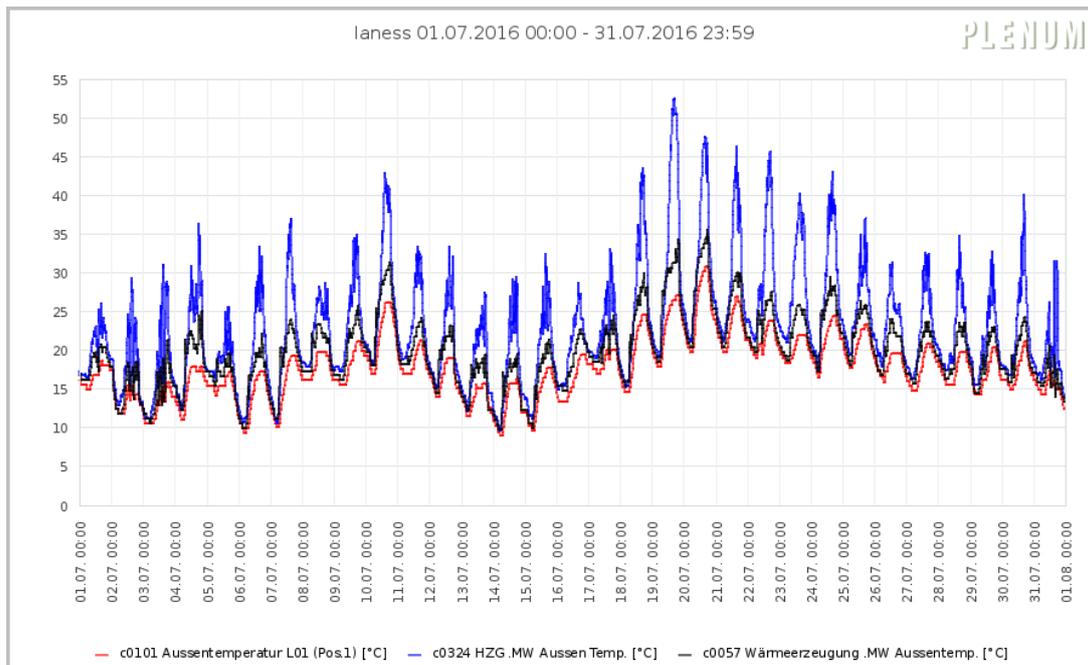


Abbildung 9.4-15: Außentemperaturen

F15

Abbildung 9.4-16 zeigt Temperaturen des Pufferspeichers. Der blau gezeichnete Messpunkt liegt dabei zwischen den beiden anderen. Trotzdem weichen die Messdaten nach oben ab. Der Messpunkt ist eine Eingangsgröße für den Regler der Kesselleistung, welche somit nicht mehr korrekt funktioniert. Ursache für den Fehler ist ein Wackelkontakt im Temperatursensor, der daraufhin behoben wurde. Die Erkennung erfolgt über eine Grenzwertprüfung der Speichertemperaturen.

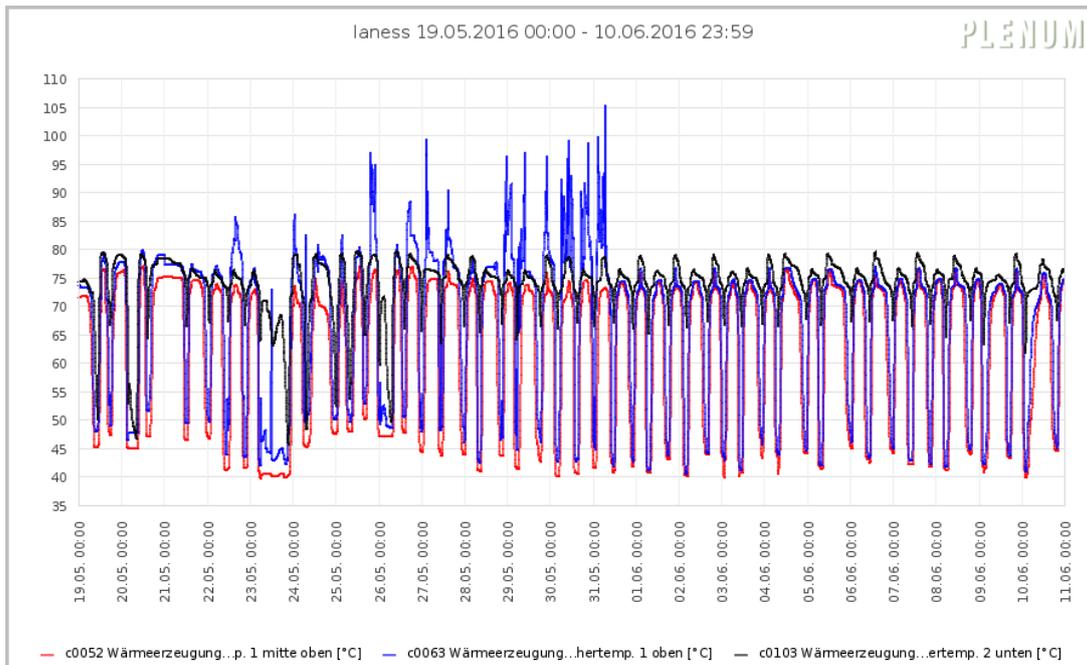


Abbildung 9.4-16: Temperatur Pufferspeicher

F16

Durch eine fehlerhafte Konfiguration der Erfassung des Verbrauchervolumenstroms werden nur Werte bis 20m³/h angezeigt, wird dieser Wert überschritten wird eine 0 ausgegeben, siehe Abbildung 9.4-17. Die Analyse der Verbrauchsdaten ist somit nicht korrekt. Die Überprüfung kann über eine Grenzwertprüfung des Volumenstroms erfolgen, solange die Heizkreispumpe in Betrieb ist. Der Fehler konnte durch eine Korrektur des Messbereiches und der der Ausgabe maximaler Durchflüsse behoben werden

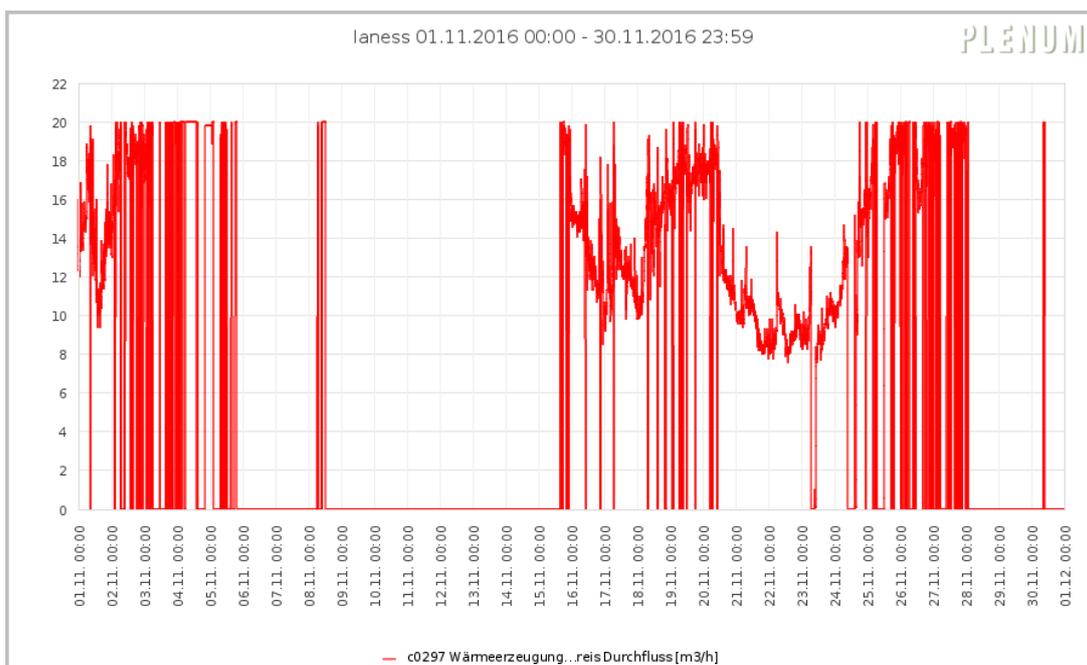


Abbildung 9.4-17: Volumenstrom Verbraucherkreis

F17

Analog zu F16 wurde der Kesselvolumenstrom als 0 angezeigt, wenn er einen Grenzwert überschritten hatte, siehe Abbildung 9.4-18. Damit funktionierte die Leistungsregelung des Kessels nicht mehr korrekt, da diese einen Mindestvolumenstrom ausregeln soll. Die Überprüfung kann über eine Grenzwertprüfung des Volumenstroms erfolgen, solange die Kesselpumpe in Betrieb ist. Desweiteren ist der Fehler F01 in dieser Grafik enthalten.

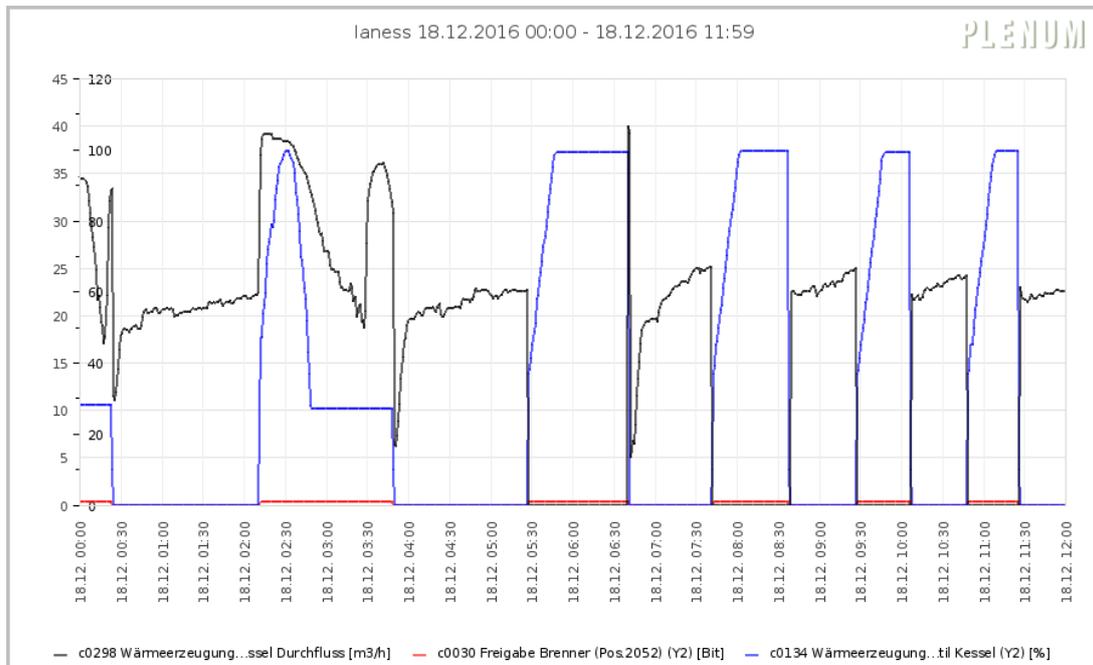


Abbildung 9.4-18: Volumenstrom Kessel

F18

In Abbildung 9.4-19 ist ein zeitweiser Datenausfall dargestellt, in diesem Fall wird der letzte bekannte Wert weitergeschrieben. Ursache ist ein Ausfall des GLT-Rechners. Die Überprüfung erfolgt in der Dateneingangskontrolle, in der geprüft wird, ob sich die Temperaturwerte im Laufe des Tages ändern.

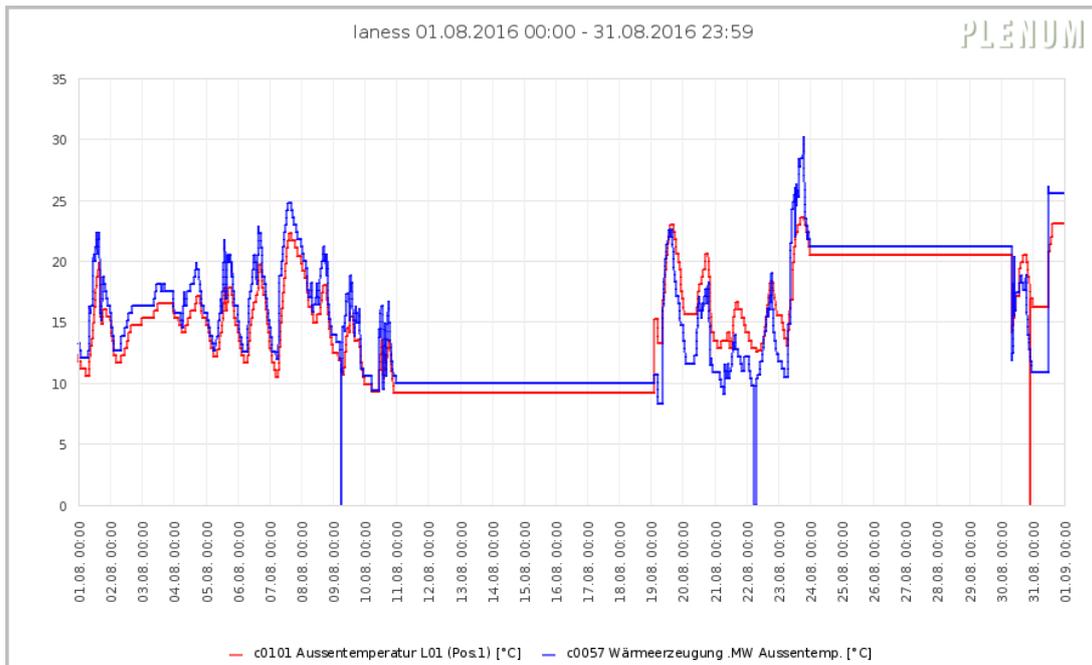


Abbildung 9.4-19: Datenausfall

F19

Analog zu Abbildung 9.4-19 ist in Abbildung 9.4-20 ein zeitweiser Datenausfall dargestellt, der allerdings nur in einem Teil der stattfindet. Ursache ist ein Ausfall einer DDC-Komponente. Die Überprüfung erfolgt in der Dateneingangskontrolle, in der geprüft wird, ob sich die Temperaturwerte im Laufe des Tages ändern.

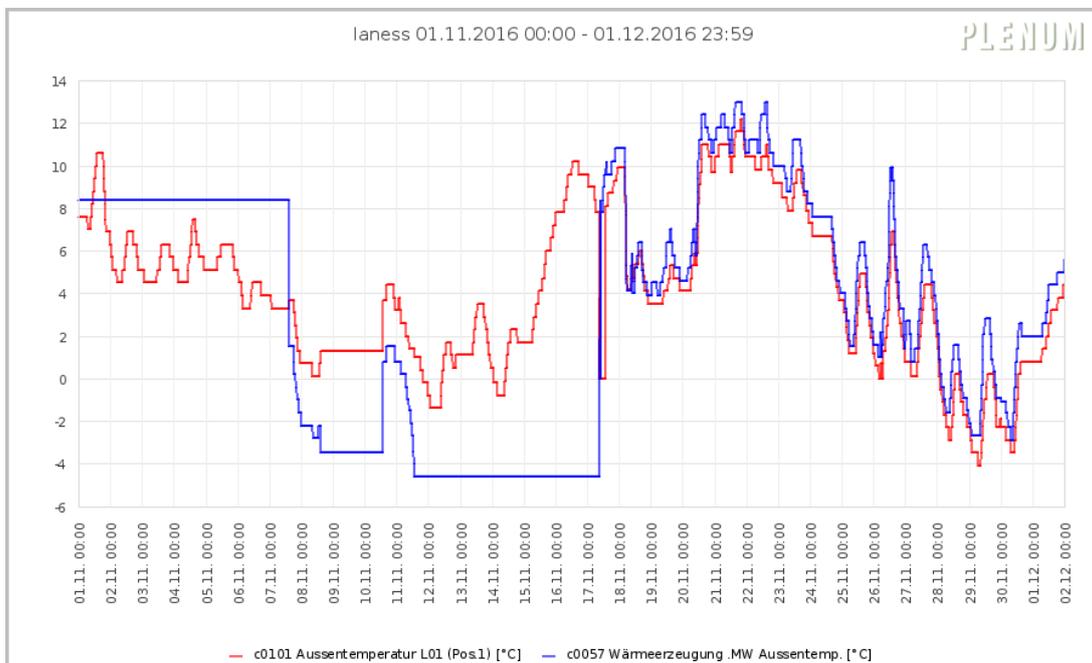


Abbildung 9.4-20: Datenausfall Bereich Wärmezeugung

9.4.2 Maßnahmen

9.4.2.1 Sanierung der Wärmeversorgung durch den Einbau eines neuen Spitzenlastkessels

Der ursprünglich vorhandene Niedertemperaturkessel mit einer Leistung von 1,2 MW wurde längere Zeit falsch betrieben. Nach dem Kesselstart wurde der Brenner beim Erreichen der Solltemperatur von 75 °C abgeschaltet. Bedingt durch die kurze, dafür benötigte Laufzeit erreichte der Kessel auf diese Weise nicht seine erforderliche Mindesttemperatur und es kam zu einer tauwasserbedingten Korrosion.

Es wurde beschlossen den Kessel durch einen Brennwertkessel mit gleicher Leistung zu ersetzen, um eine Versorgungssicherheit auch bei Ausfall der BHKWs sicherzustellen. Die zwei BHKWs mit einer thermischen Leistung von jeweils 189 kW decken die Grundlastversorgung der Liegenschaft ab. Bei dem derzeitigen Stromverbrauch kann ihre elektrische Leistung von insgesamt 180 kW jederzeit eingespeist werden.

Um die durchschnittliche Laufzeit der BHKWs und des Kessels zu verlängern dienen zwei in Reihe geschaltete Pufferspeicher mit einem Volumen von jeweils 5 m³. In diesen wird die Überschusswärme der mit konstanter Leistung betriebenen BHKWs zwischengespeichert. Die Speicher werden als passive Elemente betrieben. Es wird keine zusätzliche Pumpe benötigt. Bedingt durch die langen Versorgungsleitungen mit einer Abmessung von DN65 und die maximal zur Verfügung stehenden Differenzdrücke, ist die Beladung bzw. Entladung der Pufferspeicher auf einem maximalen Durchfluss von rund 10 m³/h begrenzt. Durch entsprechend geschaltete Temperaturfühler in den Pufferspeichern werden die BHKWs sowie der Kessel ein- und ausgeschaltet.

9.4.2.2 Änderung des Heizungsverteilers

Die Wärmeverteilung in das Gebäude und die Zwischenspeicherung in den Speichern waren nach mehrfachen Umbauten nicht mehr zweckdienlich und überschaubar. Aus diesem Grund wurde der Heizungsverteiler neu aufgebaut und mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet. Auf dem Heizungsverteiler wurde ein zusätzlicher Abgang für einen weiteren Wärmeversorger vorgesehen. Es könnte sich hierbei um einen mit Biomasse betriebenen zusätzlichen Heizkessel handeln, welcher in einem Nebenraum aufgestellt werden könnte. Für die Wärmeversorgung der gesamten Liegenschaft, mit Ausnahme der Warmwasserbereitung im Laborgebäude wird eine witterungsgeführte Vorlauftemperatur erzeugt. Auf diese Weise ist es möglich, trotz noch bestehender Bypässe bei einigen Verbrauchern die Rücklauftemperaturen im Sommer so weit zu begrenzen, dass die Vorlauftemperatur der BHKWs zuverlässig unter 60 °C bleibt und das durch die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf bedingte effektive Speichervermögen ausreicht ausreichend lange jeweilige Laufzeiten der BHKWs sicherzustellen.

Durch Bypässe bedingt sind die in der Liegenschaft umlaufenden Volumenströme höher als unbedingt erforderlich. Dies führt zu überhöhten Rücklauftemperaturen und einem unnötig hohen Stromverbrauch der Verteilungspumpe. Die dafür verantwortlichen Verbraucher zu identifizieren ist nicht trivial, da keine Volumenstrommessungen an einzelnen Verbrauchern oder auch Verbrauchergruppen erfolgen. Hinweise liefern die Rücklauftemperaturen, welche an vielen Stellen erfasst werden. Allerdings handelt es sich teilweise um Anlegefühler und die Ergebnisse sind nicht einfach zu interpretie-

ren. Lange Zeit stellten die Gewächshäuser und die Lüftungsanlage im Technikumsgebäude wesentliche Bypässe dar. Nach der Außerbetriebnahme und dem Abbruch eines Gewächshauses sowie der Änderung der Ansteuerung des Wärmeverteilers des zweiten Gewächshauses sollte sich dieser Bypass deutlich verringert haben. Bei den Rücklauftemperaturen dieses Versorgungsstranges wurde aber keine signifikante Abnahme der entsprechenden Rücklauftemperatur festgestellt.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Forschungsprojektes am 26.9.2017 eine zusätzliche Messung durchgeführt, um die Volumenströme der Verbraucher bei Außentemperaturen um 18 °C zu bestimmen. Der vollständige Untersuchungsbericht befindet sich im Anhang B.

Der Heizungsverbrauch sollte zu dieser Zeit gering und die Volumenströme eher durch Kurzschlüsse bedingt sein. Bei einem insgesamt umlaufenden Volumenstrom von 27-30 m³/h wurden folgende besonders große Einzelverbraucher identifiziert:

Lüftung Technikum	8,25 m ³ /h
Statische Heizung alte Verwaltung	5,00 m ³ /h
Lüftung Laborgebäude	4,95 m ³ /h
EDV alte Verwaltung	2,25 m ³ /h
Gewächshäuser	2,00 m ³ /h

Als dringlichster Sanierungsfall ergab sich die Lüftung im Technikum. Hier sollte längst schon eine Nachrüstung erfolgt sein, allerdings bestehen derzeit beim LANUV Pläne für eine Umnutzung der Räumlichkeiten. Daher wurde die Sanierung verschoben. Als kurzfristige Maßnahme schlagen wir daher vor, während der frostfreien Zeit die Wärmeversorgung der Technikumslüftung abzustellen und sie nur bei Frost zu öffnen um ein Einfrieren zu verhindern. Damit kann der größte Bypass der immerhin für knapp 30 % des Gesamtdurchflusses im Sommer verantwortlich ist den größten Teil der Zeit geschlossen werden.

Der zweite große Durchfluss wurde mit 5,00 m³/h bei der statischen Heizung der alten Verwaltung gemessen. Da bei den Außentemperaturen praktisch keine Notwendigkeit besteht noch zu heizen, vermuten wir einen fehlenden hydraulischen Abgleich der Heizkörperventile. In diesem Fall können einige wenige offenstehende Ventile diesen Durchfluss auch ohne Wärmeabnahme verursachen. Zur Behebung dieses Fehlers sollten in der alten Verwaltung alle Heizkörper mit voreinstellbaren Thermostatventilen und neuen Thermostatköpfen ausgerüstet werden. Die Wassermengen müssen auf den Wärmebedarf der entsprechenden Räume eingestellt werden. Dies ist eine einfach durchzuführende Maßnahme. Sie sollte in jedem Fall vorgenommen werden um die unnötig umlaufenden Wassermengen zu verringern.

Der drittgrößte Verbraucher sind mit knapp 5 m³/h die Lüftungsanlagen im Laborgebäude. Die Ursache für diesen hohen Durchfluss ist noch zu klären. Es ist denkbar, dass die Lüftungsanlagen mit konstanten Wassermengen betrieben werden. Dies war früher, zu Zeiten unregelmäßiger Versorgungspumpen, üblich und bei einem Gaskessel führte diese Betriebsweise, welche mit hohen Rücklauftemperaturen verbunden ist, auch zu keinen Problemen. Beim Einsatz von BHKWs allerdings kann es zu Problemen und Betriebsabschaltungen kommen, wenn die Rücklauftemperaturen zu hoch sind. Daher ist es notwendig, solche früher üblichen Betriebsweisen zu ändern und Bypässe zu beseitigen.

Die Identifizierung ist schwierig, da im Rahmen der Heizungsregelungstechnik nur die betriebsnotwendigen Signale erfasst werden. Rücklauftemperaturen und Durchflüsse, welche eine Beurteilung des Anlagenverhaltens gestatten, gehören nicht dazu. Mobile Messungen ermöglichen es, solche fehlenden Daten zu erhalten, stellen aber immer nur die zum Zeitpunkt der Messung vorliegenden Verhältnisse dar. Das Aufschalten zusätzlicher Messpunkte für Rücklauftemperaturen, Drücke und Durchflüsse vergrößert die zu beurteilende Datenmenge und erfordert eine zweckmäßige Aufbereitung der Anlagenbetriebsdaten.

Es wäre aber auch möglich, dass bei den Lüftungsanlagen eine teilweise Entfeuchtung stattfindet und deshalb auch außerhalb der Heizperiode ein Heizungsbedarf besteht. Die Entscheidung darüber, welche Verhältnisse vorliegen sollte auf Grund einer Besichtigung vor Ort, eventuell ergänzt durch eine mobile Messung, erfolgen und in der Folge sollten die notwendigen Maßnahmen zur Beseitigung von Bypässen veranlasst werden.

Die übrigen Verbraucher sind für das Problem der Bypässe von untergeordneter Bedeutung. Insbesondere sind die Maßnahmen zur Beseitigen der Bypässe im Bereich der Gewächshausbeheizung offensichtlich erfolgreich gewesen. Da noch einige Heizkörper im Untergeschoss des abgebrochenen westlichen Gewächshauses vorhanden sind und diese weitgehend ungeregelt betrieben werden wäre hier ein Austausch der Thermostatventile durch voreinstellbare Ventile wünschenswert.

9.4.2.3 Spitzenlast BHKW

Die beiden BHKWs mit einer thermischen Leistung von jeweils rund 190 kW werden wärmegeführt betrieben. Es erfolgt keine Leistungsregelung. Die Anforderung und Abschaltung der BHKWs erfolgt über Temperaturfühler in den Pufferspeichern. Das Lastprofil der Stromversorgung weist große Schwankungen auf. Die Abbildung 9.4-21 zeigt den Verlauf für das 1. Halbjahr 2013. Wird das Lastprofil allerdings um die von den BHKWs erzeugte Elektrizität ergänzt ergibt sich ein plausibler Lastverlauf. Über einem Grundlastverbrauch von 200-250 kW werden Tagesspitzen von bis zu 150 kW beobachtet. Der Verlauf von Grundlast und Tagesspitzen weist auf einen jahresspezifischen Verlauf hin. Aus energiepolitischer Sicht ergeben sich zwei wichtige Aspekte. Der Reduzierung von Grundlast sollte eine hohe Priorität zukommen, da diese Maßnahmen, wegen der langen Laufzeit von 8760 Stunden jährlich, den höchsten wirtschaftlichen Nutzen und Einsparung von CO_2 erwarten lassen.

So ergäbe eine Leistungseinsparung von 50 kW bei den derzeitigen CO_2 -Emissionsfaktoren der Stromerzeugung eine jährliche CO_2 -Minderung von 230 t.

Der zweite Ansatzpunkt für eine Effizienzsteigerung ist die Vermeidung von Stromspitzen im Tagesverlauf. Die Möglichkeit hierzu ist jahreszeitabhängig. Bei niedrigen Außentemperaturen ist der Wärmebedarf so hoch, das die BHKWs durchgehend betrieben werden können. Dies passiert dann auch. Ausfälle der BHKWs etwa durch Betriebstörungen oder Wartung erkennt man einfach am Verlauf der Betriebsstunden. Die Verhältnisse zeigt die Abbildung 9.4-23. In der übrigen Zeit könnten die Betriebszeiten der BHKWs so an den zu erwartenden Stromverbrauch der Liegenschaft angepasst werden. Dadurch ergäben sich Einsparungen bei der Inanspruchnahme von Spitzenlast. Ein entsprechendes Vorgehen erfordert eine Optimierung, welche den zu erwartenden Stromverbrauch, die benötigte Wärmeleistung und die Pufferkapazität

LANUV Essen
Stromverbrauch 2013 1. Halbjahr

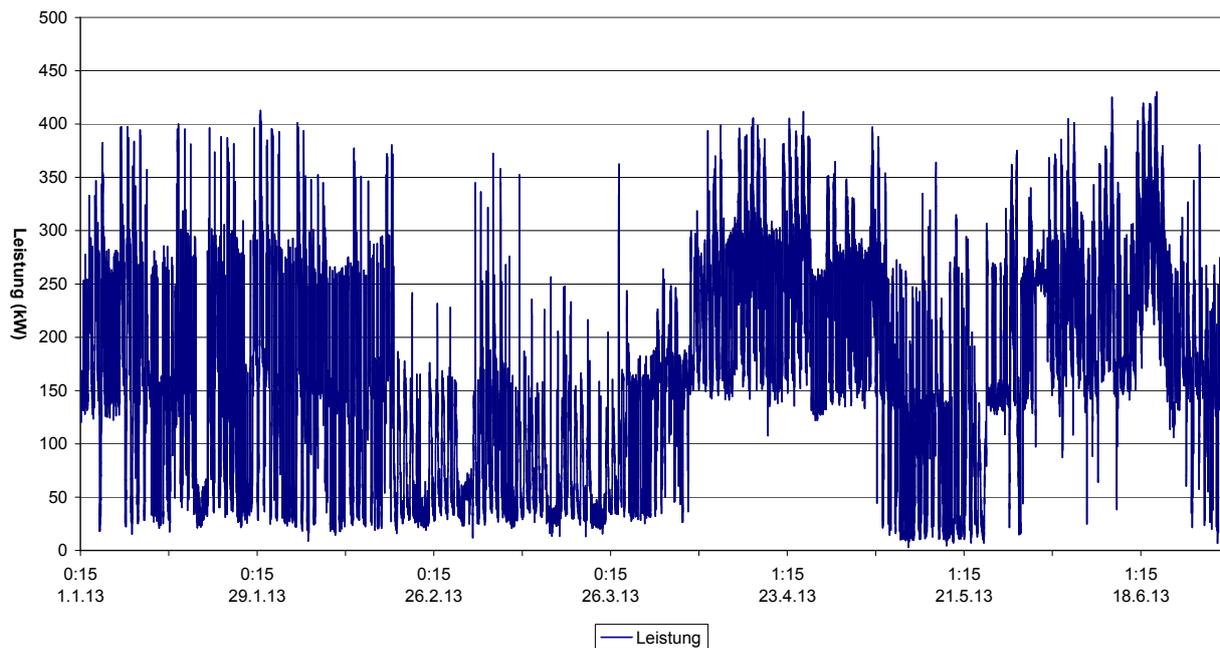


Abbildung 9.4-21: Fremdstromverbrauch im 1. Halbjahr 2013

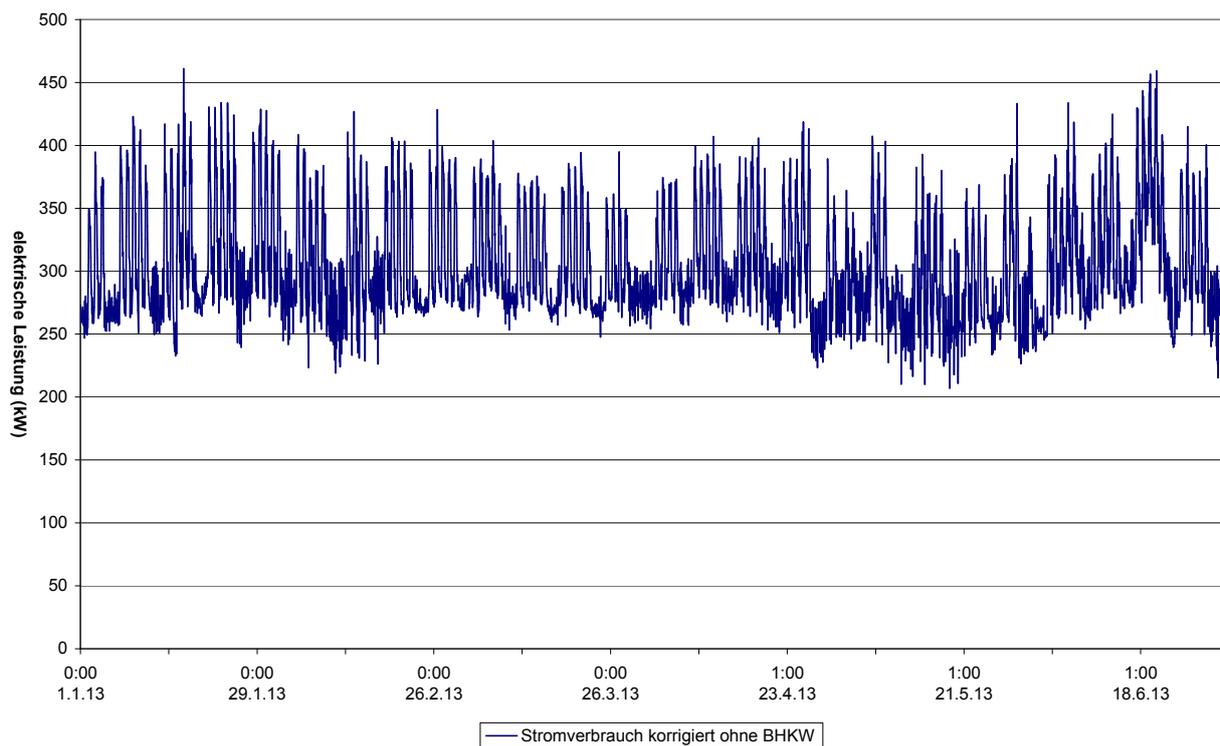


Abbildung 9.4-22: Stromlastprofil mit Eigenerzeugung durch BHKW im 1. Halbjahr 2013

der Wärmespeicher berücksichtigt. Für die eingesparte elektrische Leistung muss eine Kostenfunktion bekannt sein. Derzeit wird der Strom der Liegenschaft vom BLB im Rahmen eines Gesamtliefervertrages bereitgestellt, welcher nur die Arbeit finanziell berücksichtigt und nicht auch die Leistung. Daher fehlen derzeit die ökonomischen

LANUV Essen
BHKW-Betrieb 2015

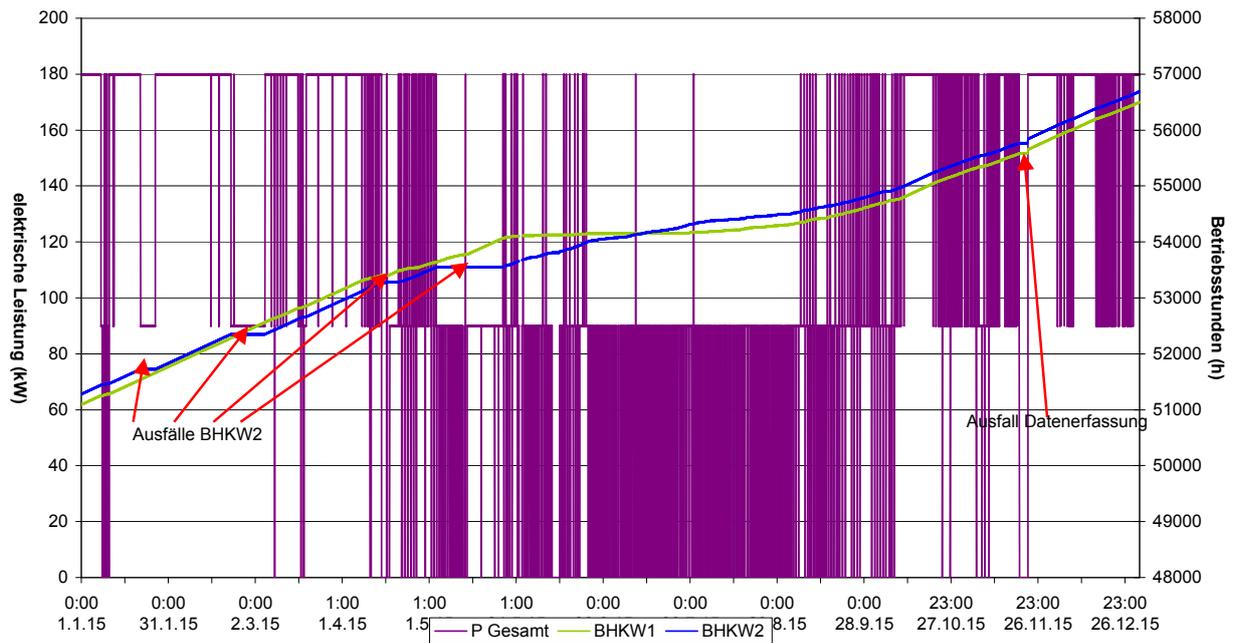


Abbildung 9.4-23: Betriebsstunden von BHKW 1 + 2, 2015

Anreize für eine Optimierung der BHKW-Betriebszeiten. Das mögliche Potenzial für Leistungseinsparungen verdeutlicht die Abbildung 9.4-24. Die grünen Punkte markie-

LANUV Essen
Strom vs. Gas - 2013

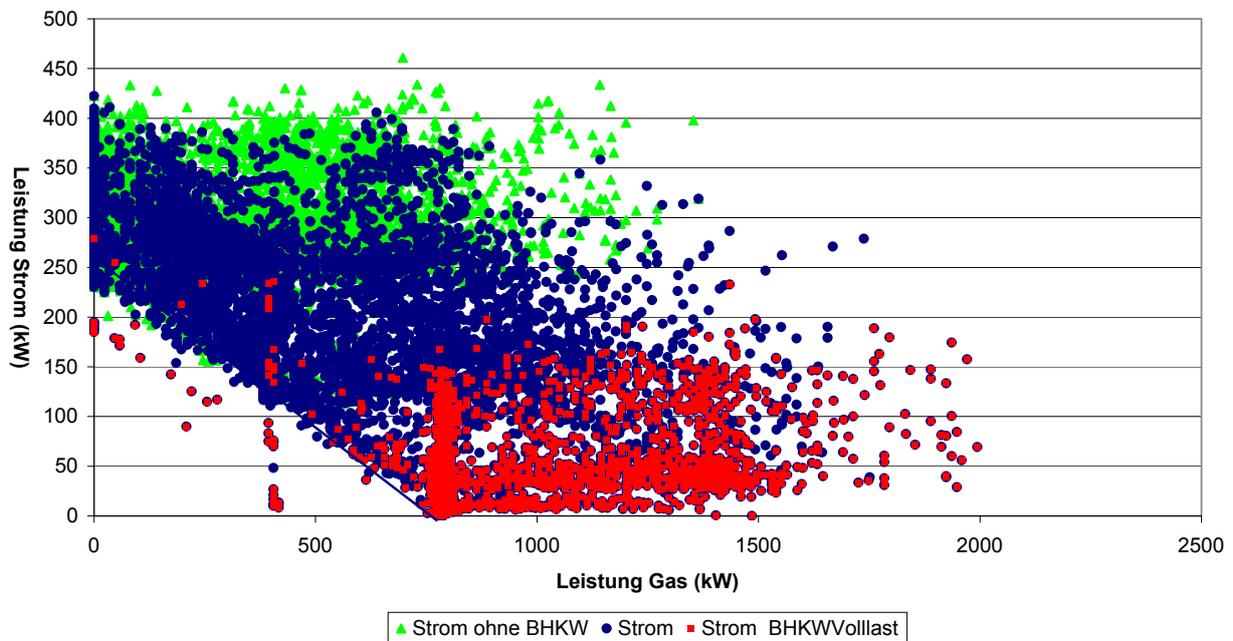


Abbildung 9.4-24: Leistungseinsparungen bei der Stromversorgung durch BHKW-Betrieb

ren den Stromverbrauch unter der Voraussetzung dass kein BHKW in Betrieb gewesen wäre. Die blauen Punkte zeigen den tatsächlichen Verbrauch. Das maximal mögliche

Einsparpotential zeigen die roten Punkte, welche bei einem Volllastbetrieb der BHKWs zu erreichen wären.

Da die BHKWs demnächst erneuert werden müssen, sollte die Möglichkeit eines geregelten Betriebes der BHKWs geprüft werden. Hierbei sind mit dem BLB die Fragen einer Bewertung der möglichen Leistungseinsparung bezogen auf den Bemessungszeitraum zu klären. Für die Regelung des BHKWs zur Reduzierung der Spitzenlast der Liegenschaft sollte an der HAW eine Masterarbeit vergeben werden. Auf die im Anhang D gezeigte Ausschreibung hat sich in dem zur Verfügung stehenden Zeitraum kein Student beworben.

9.4.2.4 Regelung Gaskessel

Im Zuge des Forschungsprojekts ModQS [2] wurde im LANUV Essen die Regelstrategie der Wärmeerzeugung optimiert. Während des Projektzeitraums von Observe wurde der defekte Gaskessel gegen einen neuen ausgetauscht und in diesem Zuge auch die hydraulische Einbindung verbessert und die Regelstrategie optimiert. Der Reglerentwurf erfolgte modellbasiert in Matlab / Simulink nach dem in Abbildung 9.4-25 gezeigtem Ablauf. Die Ziele der Regelung sind wenig Startvorgänge und lange Lauf-

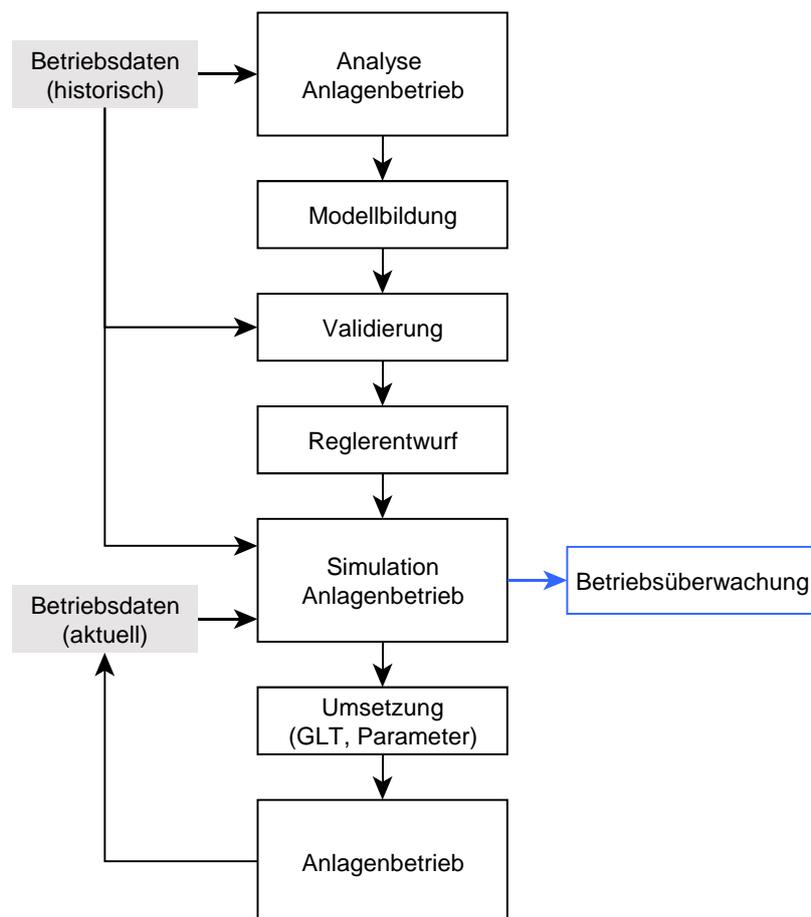


Abbildung 9.4-25: Ablauf der Modellbildung und Betriebsanalyse [2]

zeiten der Wärmeerzeuger. Die BHKWs sollen bevorzugt verwendet werden. Folgende Regelstrategie wurde erarbeitet und auch umgesetzt:

Die Solltemperatur des Verbraucherkreises wird über eine Außentemperaturabhängige Heizkurve ermittelt. Auf Anforderung ist für die Legionellenvorsorge des Warmwasserbereiters die Solltemperatur anzuheben. Das An- und Ausschalten der Wärmeerzeuger erfolgt nach einer fest vorgegebenen Reihenfolge: ein BHKW, zwei BHKW, zwei BHKW und der Kessel, beim Ausschalten genau andersherum. Die Einschaltbedin-

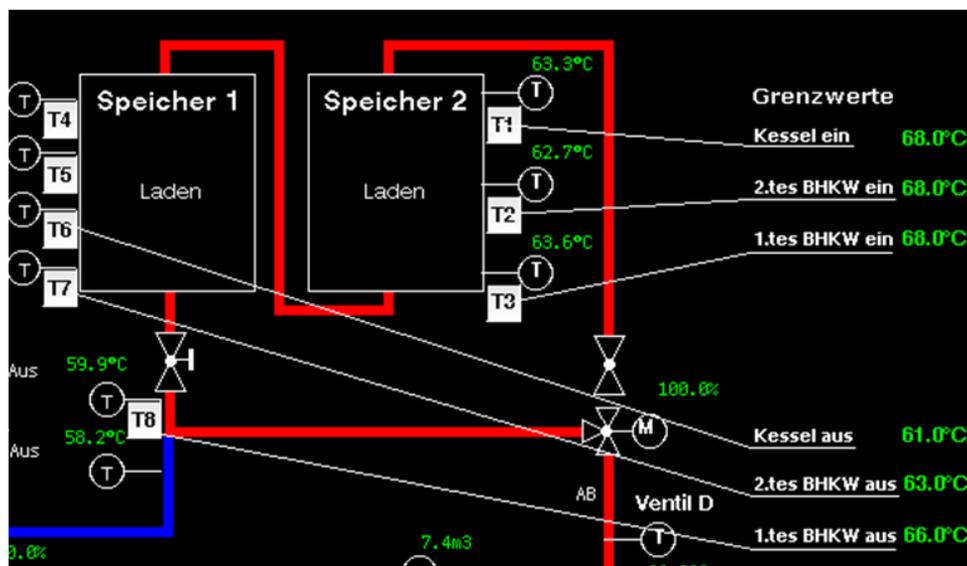


Abbildung 9.4-26: Fühlerpositionen am Pufferspeicher

gungen werden in Sequenz anhand der Speichertemperaturen definiert, die Fühlerpositionen sind aus Abbildung 9.4-26 ersichtlich.

- Fällt die Temperatur T3 unter 68°C (vom Nutzer verstellbare Variable) wird ein BHKW eingeschaltet.
- Fällt die Temperatur T2 unter 68°C (vom Nutzer verstellbare Variable) wird das zweite BHKW eingeschaltet.
- Fällt die Temperatur T1 unter 68°C (vom Nutzer verstellbare Variable) wird der Kessel eingeschaltet.

Auch die Ausschaltbedingungen werden anhand der Speichertemperaturen definiert:

- Steigt die Temperatur T6 über 61°C (vom Nutzer verstellbare Variable) wird der Kessel ausgeschaltet.
- Steigt die Temperatur T7 über 63°C (vom Nutzer verstellbare Variable) wird ein BHKW ausgeschaltet.
- Steigt die Temperatur T8 über 66°C (vom Nutzer verstellbare Variable) wird das zweite BHKW ausgeschaltet.

Die Regelung der BHKWs erfolgt in einem eigenen Regler, dieser benötigt nur die Information, wie viele BHKWs in Betrieb sein sollen. Die Entscheidung, welches BHKW gestartet oder gestoppt wird, geschieht in dem internen Regler anhand der Laufzeiten. Für die Leistungsregelung des Kessels wurde folgende Regelstrategie umgesetzt: Es wird ein konstanter Vorlauftemperatursollwert 80°C (Parameter in Benutzeroberfläche) definiert und von der Brennerregelung geregelt. Die eigentliche Leistungsregelung erfolgt über die Speichertemperatur, der Speicher soll immer "halbvoll" gehalten werden: bei Kesseleinschalten soll der Volumenstrom so geregelt werden, dass der Speicher leicht geladen wird (aus Volumenstromsonde Speicher, Sollwert 0,5m³/h, (Parameter in Benutzeroberfläche)). Wird Speicher 1 oben ("kalter Speicher", T4) wärmer als 66°C (Parameter in Benutzeroberfläche) soll der Durchfluss durch den Kessel so geregelt werden, dass der Speicher mit 0,5m³/h (Parameter in Benutzeroberfläche) entladen wird. Sinkt der Wert wieder unter 62°C (Parameter in Benutzeroberfläche), soll der Durchfluss wieder auf +0,5m³/h geregelt werden. Weiterhin wurden eine minimale und maximale Durchflussmenge vorgegeben.

9.4.3 Warmwasserbereitung Kantine

Für die Warmwasserbereitung wird eine Vorlauftemperatur von mindestens 75 °C benötigt. Da es bei der derzeitigen Konfiguration der Wärmeerzeugung zu hohen Rücklauftemperaturen und Durchflüssen kommt, beeinflusste die Warmwasserbereitung im Sommer negativ die Gesamtrücklauftemperatur, insbesondere in Verbindung mit den vorhandenen Bypässen. Aus diesem Grund wurde der Warmwasserbereiter im Neubau der Verwaltung mit einer elektrischen Heizpatrone ausgestattet, um die Heizkurve der außentemperaturabhängigen Gesamtvorlauftemperatur im Sommer absenken zu können. Bezogen auf die Gesamtrücklauftemperatur im Sommer war diese Maßnahme erfolgreich. Allerdings reicht die Heizleistung von 6 kW nicht aus Temperaturen zu erreichen, bei denen eine Legionellenvorsorge möglich ist. Um dieses Risiko langfristig zu vermeiden und gleichzeitig den Stromverbrauch zu reduzieren, wäre es wünschenswert eine thermische Solaranlage zu installieren, welche den Warmwasserbedarf im Sommer deckt. Auf diese Weise könnte der Stromverbrauch um rund 25 000 kWh jährlich gesenkt werden. Dies entspricht rund 2 % des Stromverbrauchs der gesamten Liegenschaft.

9.5 Bezirksregierung Düsseldorf

Das Gebäude der Bezirksregierung in der Cecilienallee 2 wird indirekt mit Fernwärme beheizt. Mittels zweier Wärmeübertrager mit einer Leistung von 750 kW wird über Ventile auf der Primärseite eine Außentemperaturgeführte Vorlauftemperatur eingestellt. Die Heizkreise auf der Sekundärseite werden alle mit der gleichen Vorlauftemperatur beaufschlagt. Es wird nur eine Pumpe zur Verteilung der Wassermenge benötigt. Da das Gebäude über eine oben liegende Verteilung und eine unten liegende Sammlung der Heizkreise verfügt, kann die Umwälzpumpe mit einer Proportionalregelung mit einer maximalen Leistung von 400 W betrieben werden. Bei einer Wärmeleistung von 1,2 MW bedeutet dies eine Antriebsleistung von $0,3 \text{ W}_{el} / 1 \text{ kW}_{thermisch}$. Dies ist selbst für neu errichtete Heizungssysteme ein außerordentlich guter Wert.

Bisher werden alle Heizkreise mit nur einer Außentemperaturabhängigen Vorlauftemperatur betrieben. Eine Nacht- oder Wochenendabsenkung durch eine Absenkung der Vorlauftemperatur ist auf diese Weise nicht möglich, da auch die Wohnung des Hausmeisters mit dieser Vorlauftemperatur versorgt wird.

9.5.1 Fehler

Tabelle 9.5-1: Relevante Fehler Bezirksregierung Düsseldorf

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
1	Hydraulischer Abgleich RLT, Gesamtrücklauftemperatur im Sommer ist höher als jede einzelne Rücklauftemperatur, verursacht durch volumenkonstante Regelung in einer Lüftungsanlage	Trenddaten - TRL	Drosselung Wassermenge im Bypass über Stauscheibe	behoben
2	Alterung Wärmeübertrager, die Übertragungsleistung sinkt da sich der Wärmetauscher zusetzt	Trenddaten - Betriebsdaten: Versorgungsmangel	Reinigung bzw. Austausch	behoben
3	Ausfall Warmwasser: laut Haustechnik kein warmes Wasser, bei Überprüfung festgestellt: Ventil im Keller zuge dreht	Nutzerhinweis	Ventil wieder öffnen	behoben
4	Pumpenbetrieb: bei abgeschalteten Verbrauchern wird die Heizkreispumpe nicht ausgestellt	Trenddaten	Abschaltung implementieren / aktivieren	gemeldet

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
5	Kein Absenkbetrieb außerhalb der Nutzungszeiten	Trenddaten	Nachrüstung Sensoren, ggf. bauliche Anpassung, Parametereinstellung	beauftragt
6	Heizgrenze: bei hohen Außentemperaturen wird die Heizung zu spät ausgeschaltet	Trenddaten	Einstellung Parameter	teilweise (von 27 °C auf 20 °C gestellt)

9.5.2 Maßnahmen

9.5.2.1 Senkung des Wärmeverbrauchs durch frühere Abschaltung bei hohen Außentemperaturen im Sommer

Vor Beginn des Forschungsprojektes hatte sich gezeigt, dass die Abschaltgrenzen der Heizung so hoch lagen, dass auch während des Sommers die Heizung durchgehend in Betrieb war. In der Folge war die Heizungspumpe auch durchgehend in Betrieb. Die Wärmeabgabe im Sommer schwankte um 25 kW. Es handelte sich dabei praktisch um Rohrleitungsverluste, welche das Gebäude zusätzlich aufheizen. Im Mai 2014 wurde die Heizgrenze auf ein gleitendes Tagesmittel von 20 °C abgesenkt. Die Verhältnisse zeigen die Abbildungen 9.5-1 und 9.5-2. In der Folge sinkt bei hohen Außentempe-

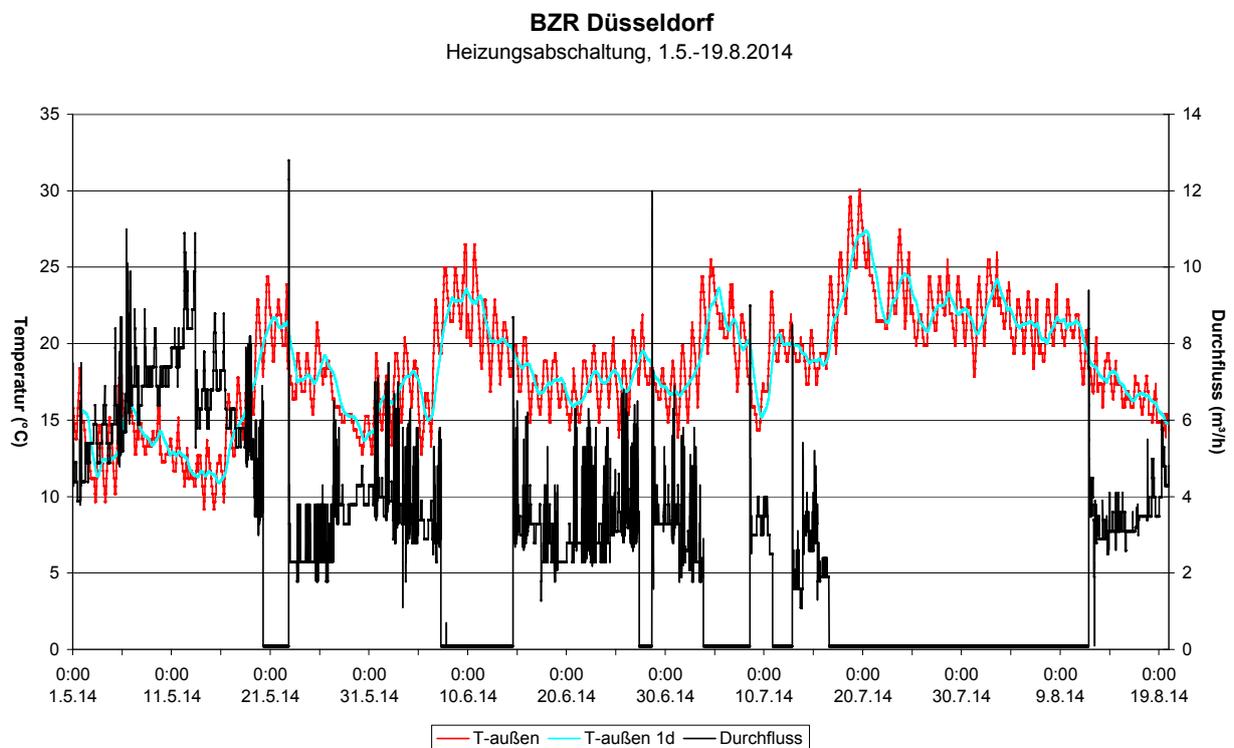


Abbildung 9.5-1: Heizungsabschaltung bei gleitendem Tagesmittelwert über 20 °C, 2014

aturen die Wärmeabgabe, wie der Vergleich der Abbildungen 9.5-3 und 9.5-4 zeigt.

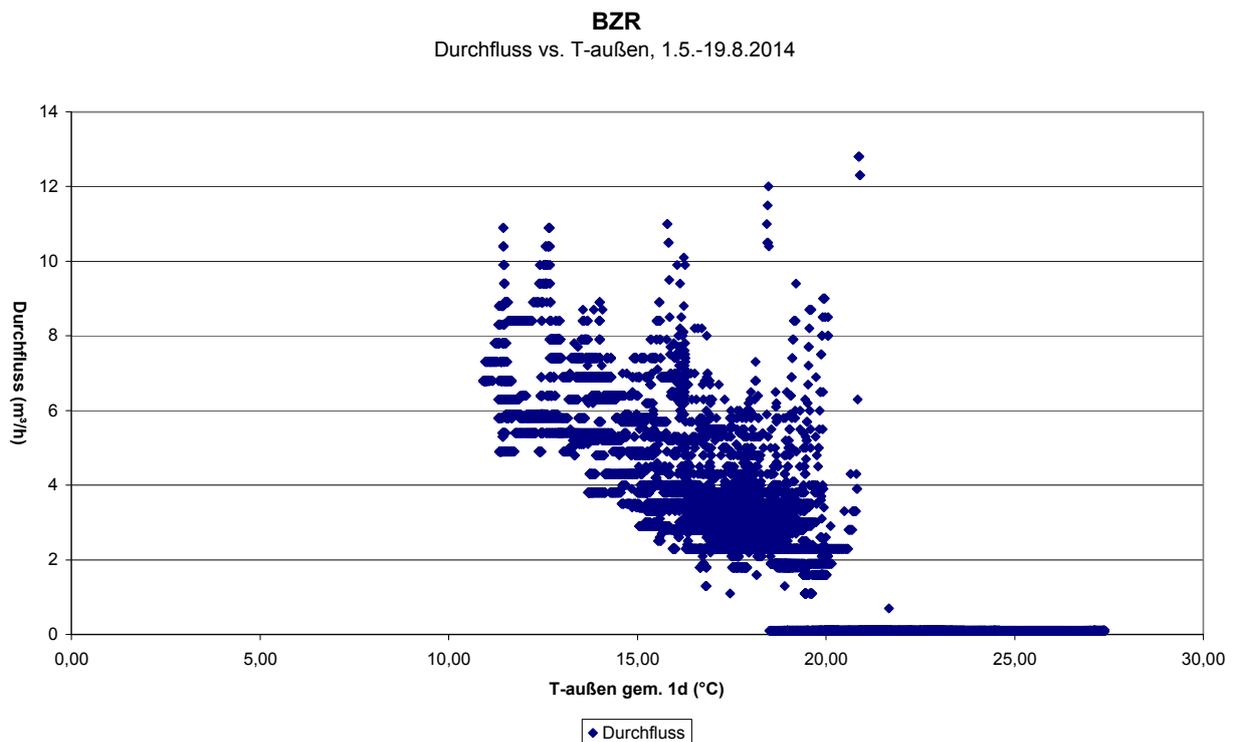


Abbildung 9.5-2: Heizungsdurchfluss vs. gleitender Tagesmittelwert, 2014

Es wurde jeweils die geordnete Wärmeleistung für 2012 und 2014 dargestellt. Zur

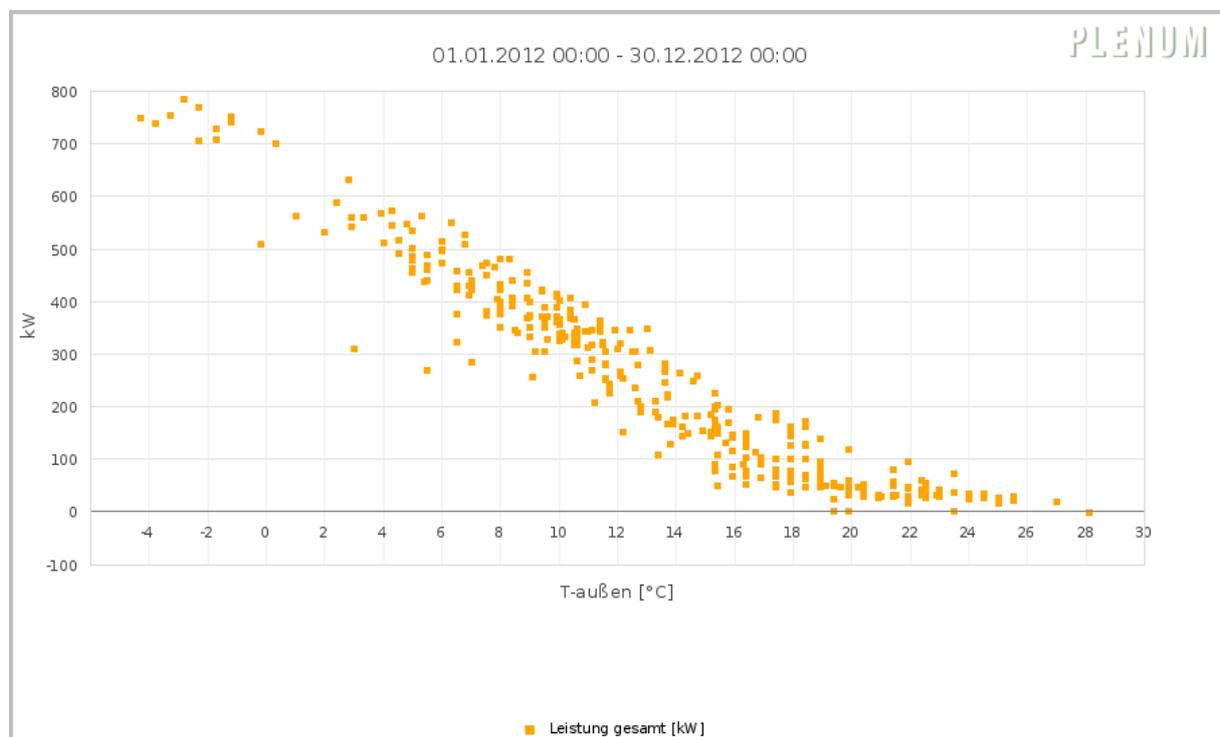


Abbildung 9.5-3: Heizleistung vs. Außentemperatur, 2012

Beurteilung der Auswirkung von Änderungen in der Beheizungsstrategie gibt es zwei Raumfühler deren Temperaturen erfasst werden. Es handelt sich um einen Raum im 4. OG sowie den Plenarsaal im Schlöbchen. Dieser wird nur zeitweilig beheizt und kann daher für die Beurteilung allgemeiner Maßnahmen nicht verwendet werden.

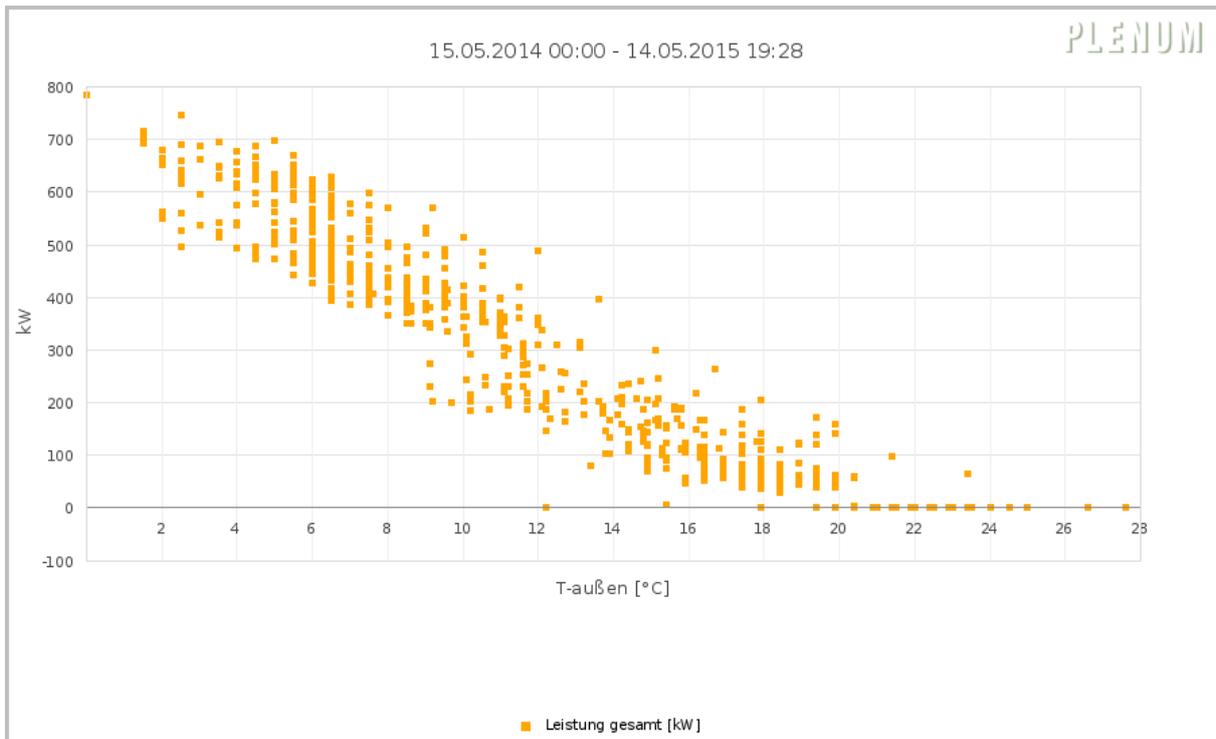


Abbildung 9.5-4: Heizleistung vs. Außentemperatur, 2014

Der Verlauf der Raumtemperatur folgt der Außentemperatur über weite Bereiche, wie die Abbildung 9.5-5 erkennen lässt. Bei näherer Betrachtung wird deutlich, dass das Fenster über lange Zeiträume geöffnet ist. Der Einfluss einer zeitweiligen Fensteröff-

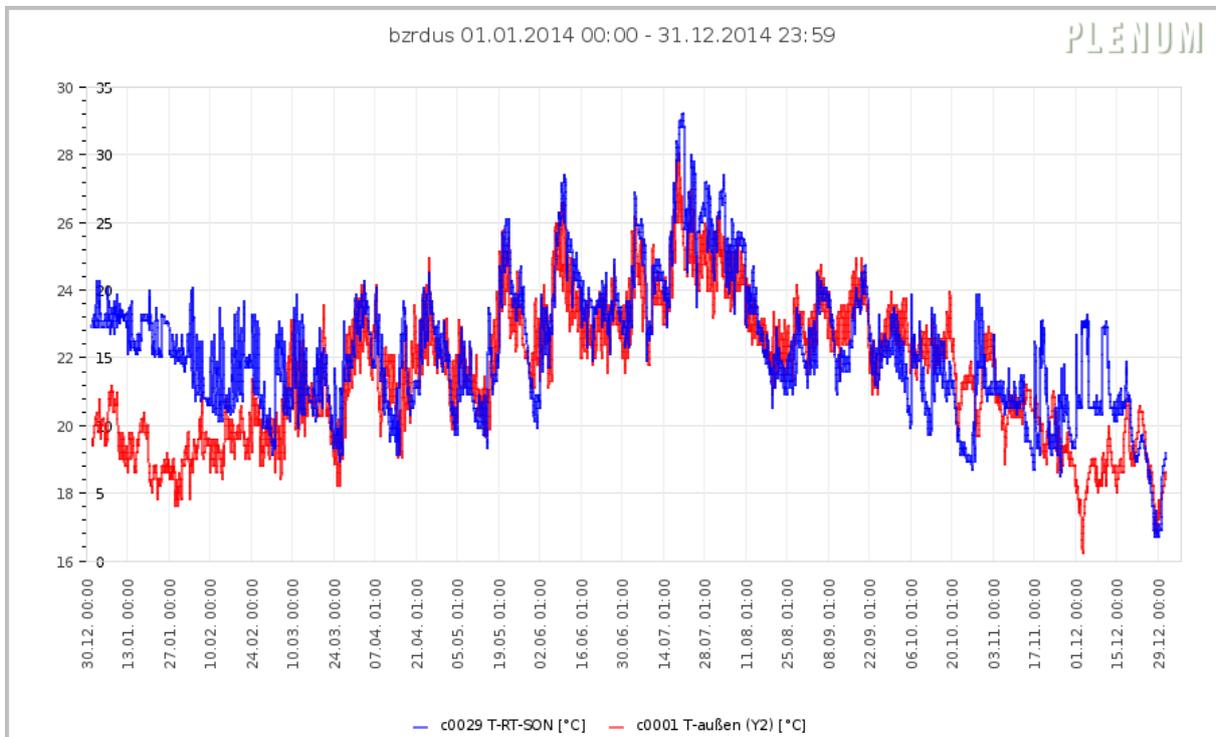


Abbildung 9.5-5: Raumtemperatur und Außentemperatur, 2014

nung auf die Raumtemperatur ist besonders gut im Dezember zu erkennen. Wird das Fenster geschlossen, steigt die Raumtemperatur auf 23,5 °C an und sinkt bei öffne-

tem Fenster auf etwas über 20,5 °C. In der Zeit zwischen Weihnachten und Silvester sinken die Temperaturen bei vermutlich geschlossenem Heizkörperventil bis auf 17 °C ab. Bei einer genaueren Betrachtung zeigt sich, dass die Raumtemperaturen häufig morgens plötzlich sinken und abends ebenso plötzlich wieder steigen. Hier ist als Ursache eine dauernde Fensteröffnung während der Arbeitszeit zu vermuten.

Betrachtet man die Korrelation zwischen Außentemperatur und Raumtemperatur in der Abbildung 9.5-6, so wird deutlich, dass die Raumtemperatur im Heizungsbetrieb bei geschlossenem Fenster und geöffnetem Heizkörperventil zwischen 23 und 24 °C schwankt, der Raum also eher überheizt ist. Wird den ganzen Tag über gelüftet, weil

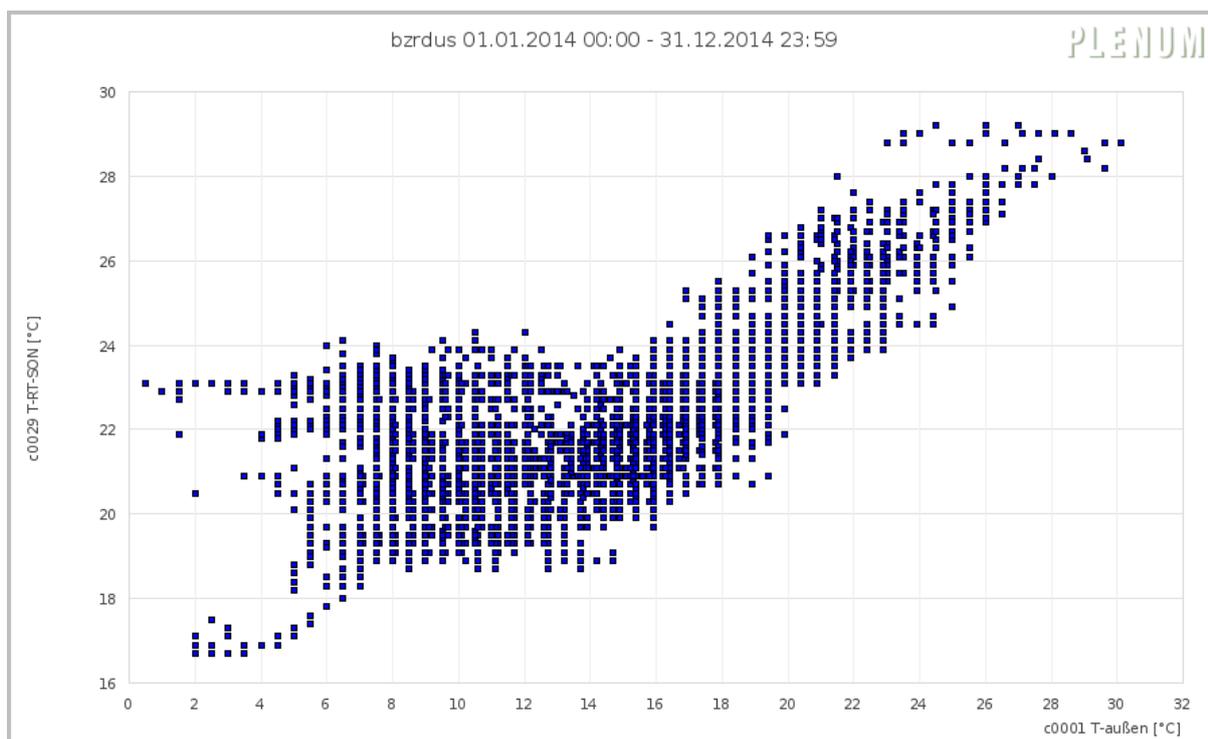


Abbildung 9.5-6: Raumtemperatur vs. Außentemperatur, 2014

der Raum als zu warm empfunden wird, wird ein unnötiger Lüftungswärmeverbrauch erzeugt. Es wird empfohlen den Mitarbeitern nahezulegen die Thermostatventile herunter zu regeln um eine Überwärmung in der Heizperiode zu vermeiden. Eine durchschnittliche Absenkung der Raumtemperatur um 2 K, welche häufig möglich ist, sollte den Wärmeverbrauch um bis zu 5 % reduzieren.

9.5.2.2 Überwachung der Wärmetauscher und Anschlussleistung

Die zur Verfügung stehende Anschlussleistung ergibt sich aus der auf der Primärseite eingestellten maximalen Wassermenge und der Differenztemperatur. Da die primäre Vorlauftemperatur witterungsabhängig geregelt wird, steigt die zur Verfügung stehende Heizleistung mit sinkender Außentemperatur. Durch eine Senkung der primären Rücklauftemperatur unter 60 °C kann die Heizleistung vergrößert werden oder bei einer benötigten Heizleistung die Wassermenge verringert werden. Die Rücklauftemperatur auf der Primärseite ergibt sich aus der Rücklauftemperatur auf der Sekundärseite und der Grädigkeit der Wärmetauscher. Die Grädigkeit ist die Differenz zwischen der

primären und der sekundären Rücklauftemperatur. Sie hängt von der abgenommenen Leistung der Wärmetauscher ab.

Wird die Grädigkeit eines Wärmetauschers über der Leistung aufgetragen, ergibt sich im Bereich normaler Durchflüsse eine weitgehend lineare Abhängigkeit. Die Steigung charakterisiert den Zustand des Wärmeübertragers. In der Abbildung 9.5-7 ist die Verschlechterung der Grädigkeit des Wärmetauschers 1 zwischen 2012 und 2016 deutlich zu erkennen. Überschreiten die Ablagerungen im Wärmetauscher ein gewisses

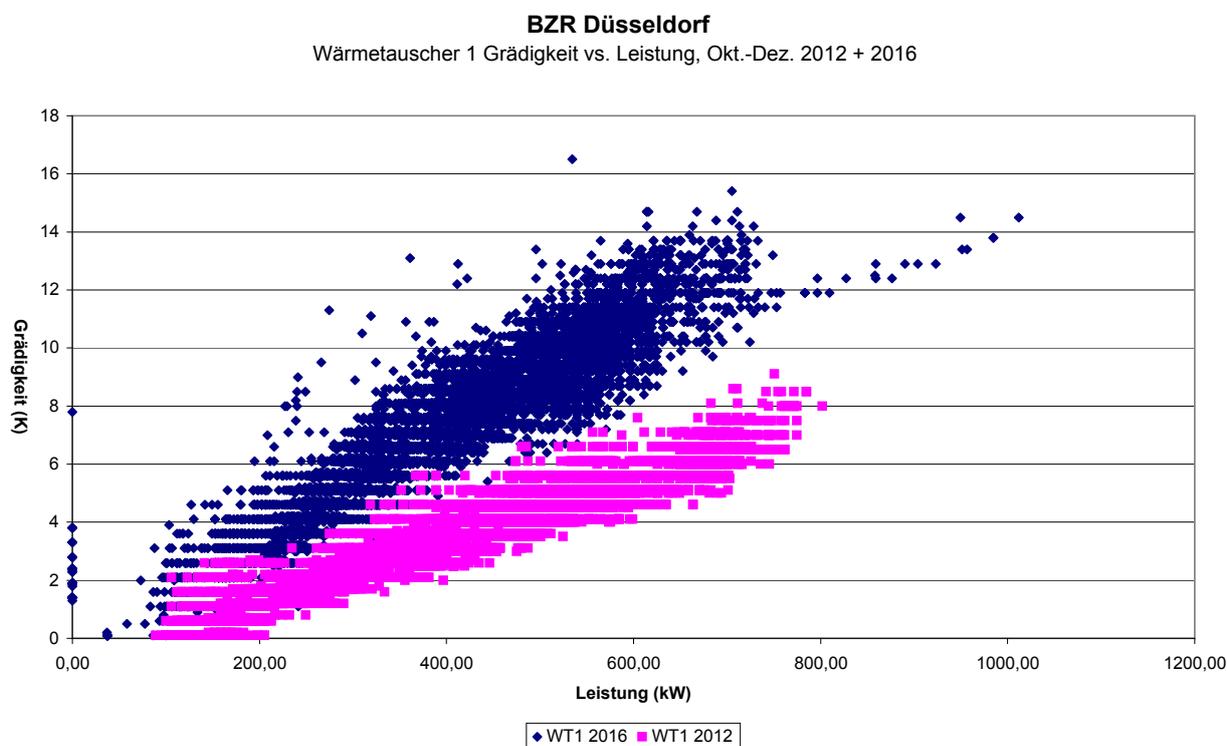


Abbildung 9.5-7: Grädigkeit WT1 2012 + 2016

Maß, so reicht die Leistung des Wärmetauschers nicht mehr aus, die vorgegebene Vorlauftemperatur zu erreichen. Das Ventil ist dann zu 100 % geöffnet. Die vollständige Öffnung des Ventils ist dann ein deutlicher Hinweis auf eine nicht ausreichende Übertragungsleistung. Die entsprechenden Verhältnisse zeigt die Abbildung 9.5-8. In der Abbildung ist auch die sommerliche Abschaltung bei hohen Außentemperaturen zu erkennen. Weiterhin fällt auf, dass das Ventil vom Wärmetauscher 2 stärker geöffnet ist als das Ventil vom Wärmetauscher 1. Gleichzeitig ist die Grädigkeit vom Wärmetauscher 2 geringer als die vom Wärmetauscher 1. Daraus ergibt sich ein Hinweis darauf, dass der Durchfluss durch den Wärmetauscher 1 kleiner ist als durch den Wärmetauscher 2.

In dem entsprechenden Streudiagramm in Abbildung 9.5-9 ist zu erkennen, dass offensichtlich bei einer Ventilöffnung von 65 % schon der volle Durchfluss erreicht wird, da danach fast nur Werte von 100 % vorkommen. Die Ventilöffnung von 100 % kann also für die signalbasierte Überwachung der Wärmetauscherleistung genutzt werden. Innerhalb von 4 Jahren hat sich die Grädigkeit der Wärmetauscher so weit verschlechtert, dass die Wärmetauscher entweder im nächsten Sommer zu reinigen sind oder ersetzt werden müssen.

Die Überwachung der Wärmetauscher ermöglicht einen sparsamen Betrieb der Hei-

BZR Düsseldorf
Ventilstellung Wärmetauscher, 2016

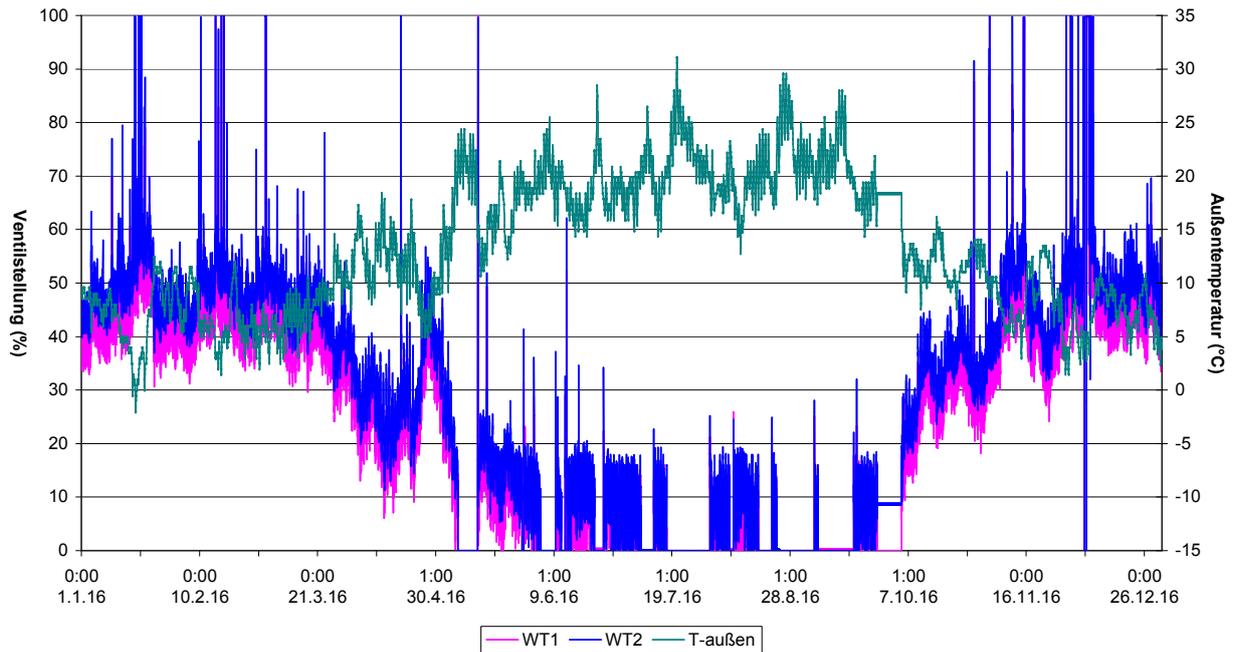


Abbildung 9.5-8: Ventilstellung Wärmetauscher und Außentemperatur, 2016

BZR Düsseldorf
Wärmetauscher Ventilstellung vs. Außentemperatur, 2016

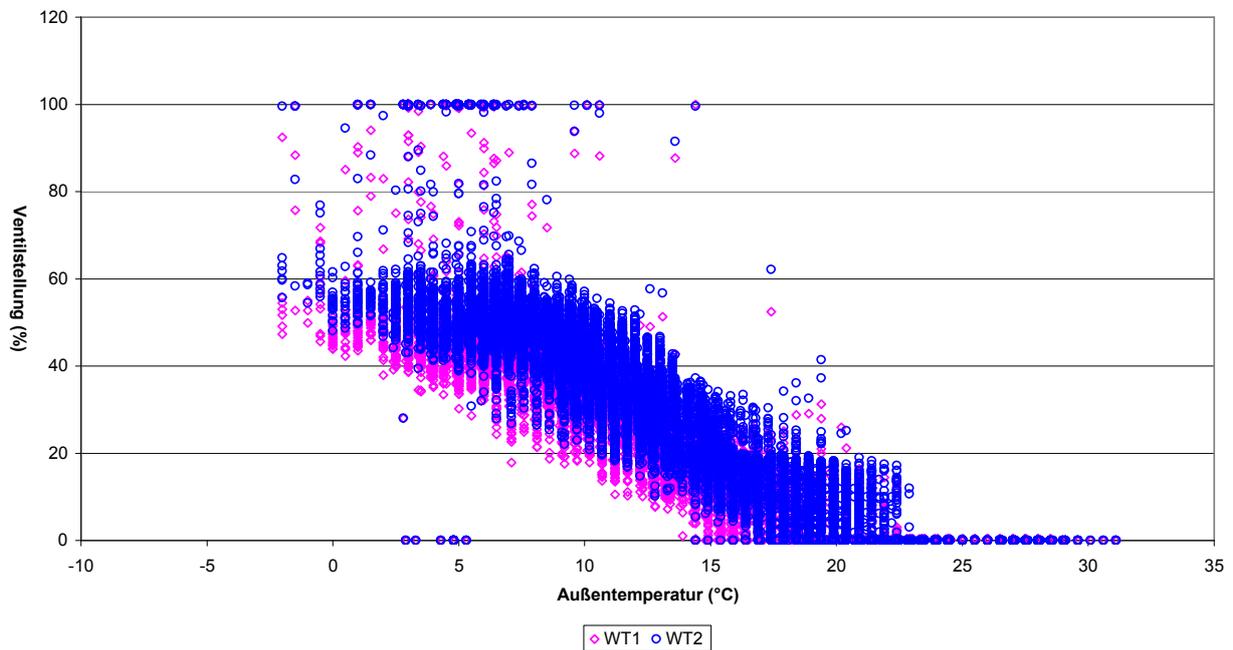


Abbildung 9.5-9: Ventilstellung Wärmetauscher vs. Außentemperatur, 2016

zungsanlage. Die Kosten für eine Reinigung bzw. einen Tausch der Wärmetauscher sind deutlich niedriger als die eingesparten Leistungskosten.

9.5.2.3 Sparsamer Pumpenbetrieb durch Differenzdrucküberwachung

Der Betrieb der Heizungsverteilungspumpe dient der ausreichenden Versorgung aller statischer Heizkörper sowie der Lüftungsanlagen. Da die ursprüngliche Wärmeversorgung der statischen Heizflächen über eine Schwerkraftheizung erfolgte, wird nur eine geringe Antriebsleistung benötigt. Im Zuge der Sanierung der Wärmeversorgung wurden die Heizkörper mit voreinstellbaren Thermostatventilen ausgerüstet und die errechneten Wassermengen eingestellt.

Die Betriebsweise der Heizungspumpe beeinflusst den Differenzdruck und die Rücklaufemperatur. Dies verdeutlichen die Abbildungen 9.5-10-9.5-12.

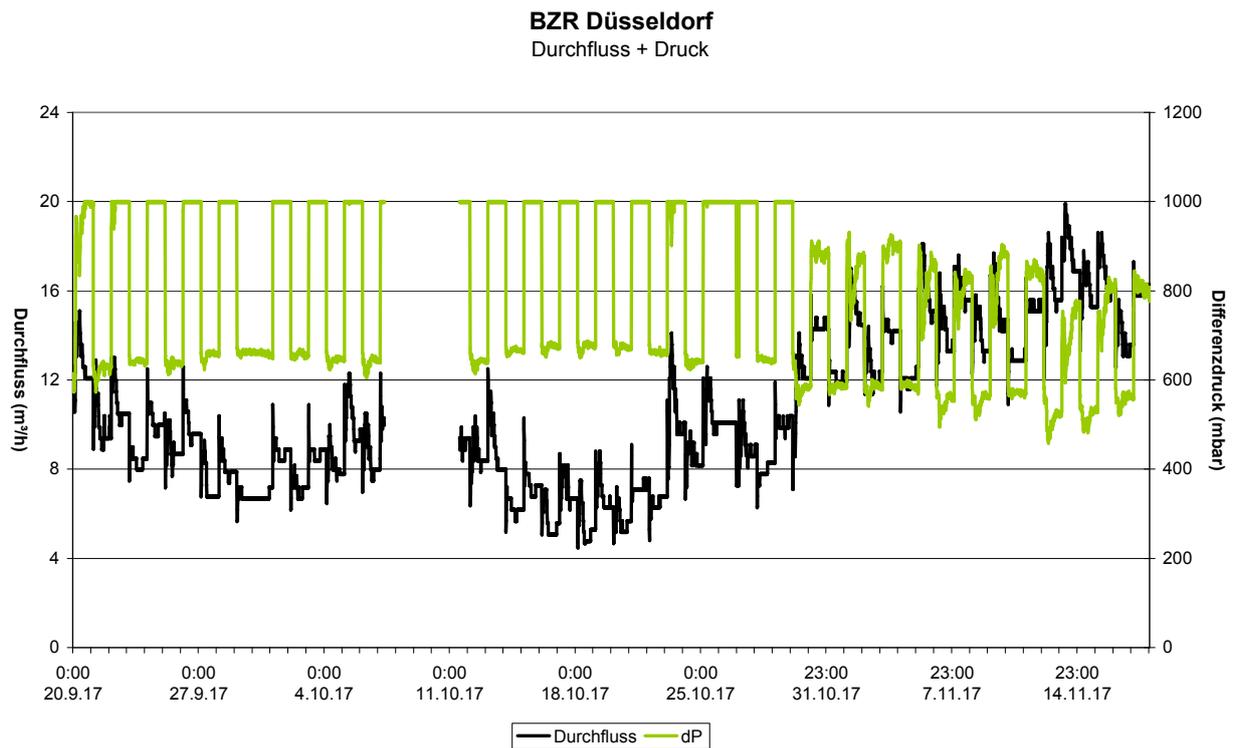


Abbildung 9.5-10: Durchfluss und Differenzdruck, 20.9.-18.11.2017

Bei sinkendem Differenzdruck sinkt auch der Durchfluss. Besonders gut zu erkennen ist dies durch die Tatsache, dass die Leistung der Heizungspumpe in dem dargestellten Zeitraum täglich gewechselt wird. Der Messbereich des Differenzdruckaufnehmers ist auf 1000 mbar begrenzt. Tatsächlich höhere Differenzdrücke werden nicht dargestellt. Die Tatsache der zwei unterschiedlichen Betriebsweisen der Pumpe zeigt die Abbildung 9.5-11.

Bei verringertem Durchfluss sinkt natürlich auch die Rücklaufemperatur, wie aus der Abbildung 9.5-12 zu ersehen ist. Eine Verringerung des Differenzdruckes verringert somit nicht nur den Stromverbrauch, gleichzeitig steigt auch die übertragbare Leistung der Wärmetauscher an.

Im Jahr 2017 wurden Umbauten am Heizungsverteiler durchgeführt. Dies führte im Jahresverlauf zu sehr unterschiedlichen Betriebszuständen der Heizung, wie die Abbildung 9.5-13 zeigt.

Es wird empfohlen den Differenzdruck im Rahmen einer Proportionalregelung der Hei-

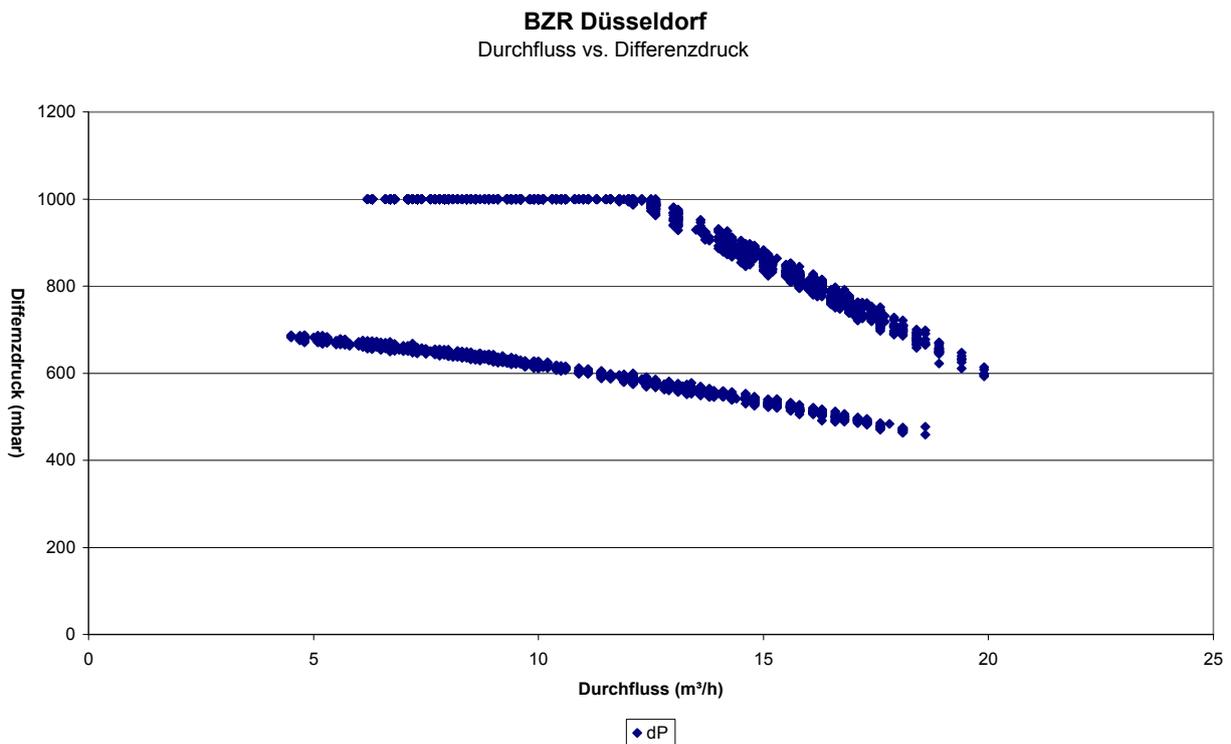


Abbildung 9.5-11: Durchfluss vs. Differenzdruck, 20.9.-18.11.2017

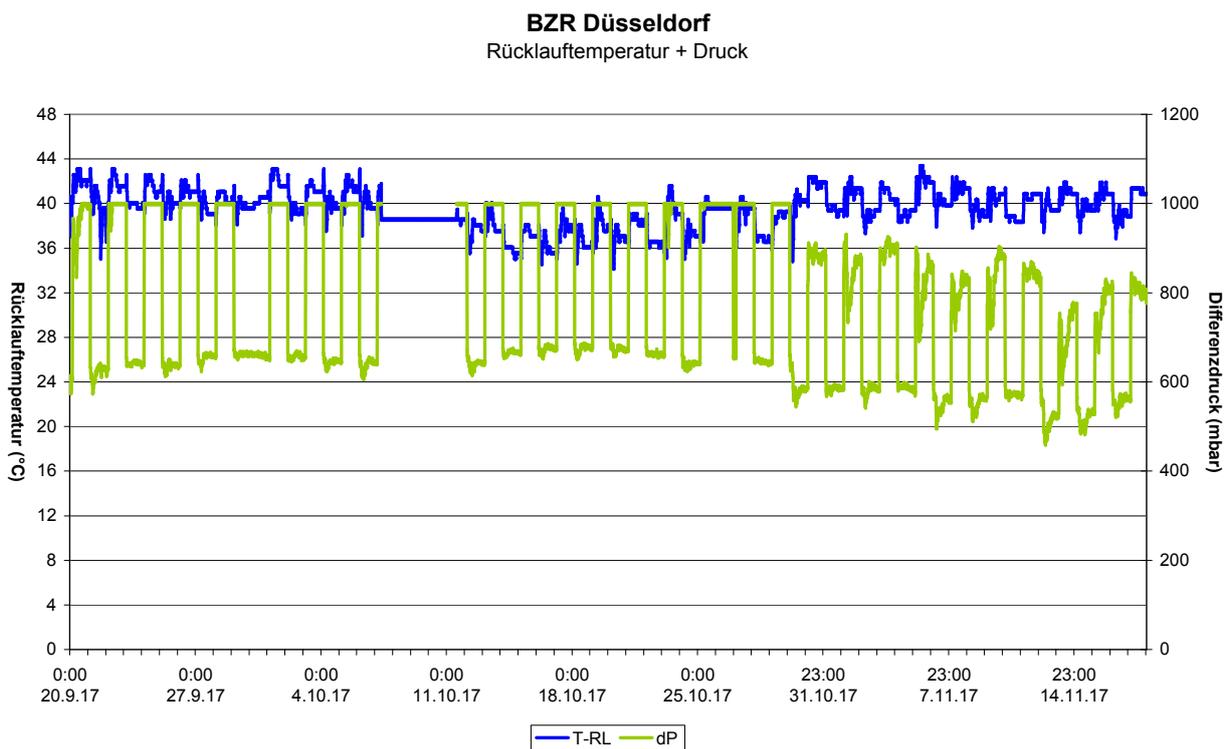


Abbildung 9.5-12: Rücklauf Temperatur und Differenzdruck, 20.9.-18.11.2017

zungspumpen so weit zu reduzieren, dass bei maximalem Durchfluss der Differenzdruck nur noch 250 mbar beträgt.

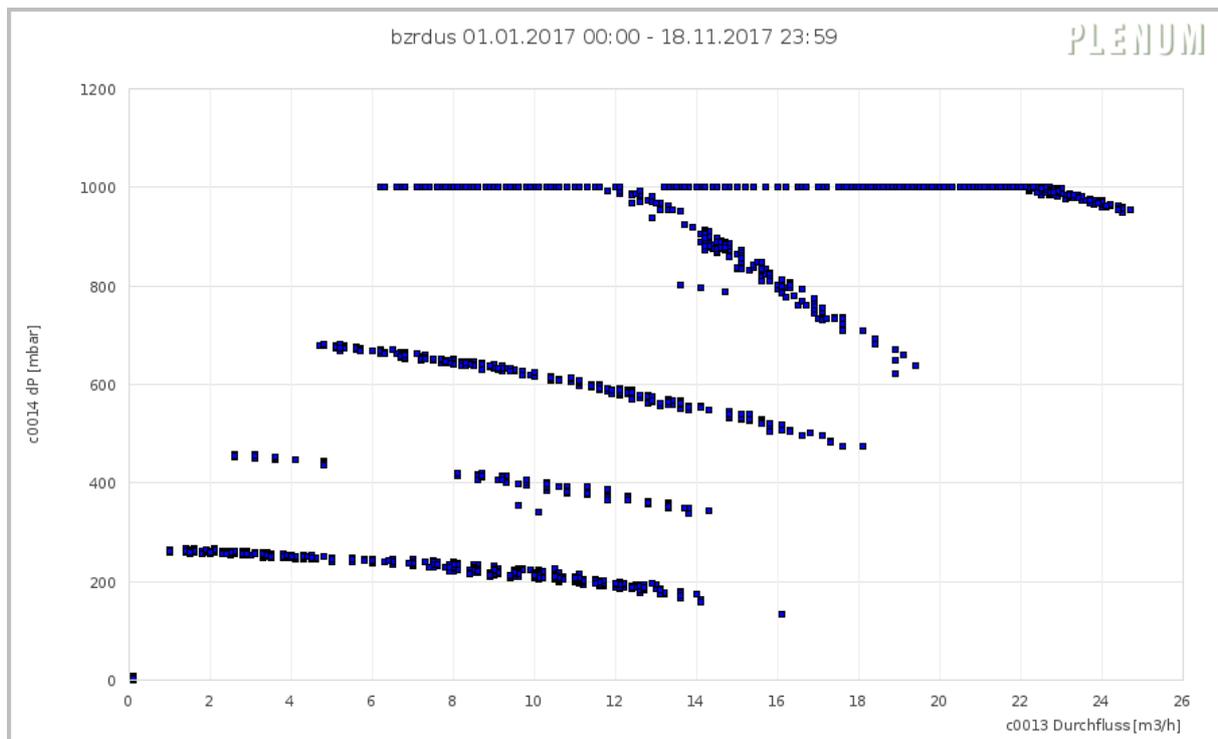


Abbildung 9.5-13: Differenzdruck vs. Durchfluss, 1.1.-18.11.2017

9.5.2.4 Wochenend- und Nachtabsenkung

Neben einer Absenkung der Raumtemperaturen durch eine aktive Beteiligung der in der Bezirksregierung tätigen Mitarbeiter besteht noch die Möglichkeit den Verbrauch durch eine verringerte Beheizung in den Nachtstunden, besonders aber an Wochenenden zu verringern. Die Ansätze hierzu haben zu großen Widerständen bei einigen Mitarbeitern geführt. Um die Bedenken auszuräumen, dass die Räume nicht mehr ausreichend beheizt werden, sollen in 40 Referenzräumen zusätzliche Raumtemperaturfühler installiert werden. Die Auswahl geeigneter Fühler und deren Stromversorgung erwies sich als schwierig. Außerdem gab es Probleme bei der Kofinanzierung durch OBSERVE, so dass sich der Aufbau verzögert hat und noch nicht abgeschlossen ist.

Außerdem war der Heizungsverteiler zu modifizieren, da die Hausmeisterwohnung ebenfalls über den Heizungsverteiler versorgt wird und bei der Hausmeisterwohnung keine Wochenendabsenkung stattfinden kann.

Die beabsichtigte Absenkung soll in mehreren Schritten vorgenommen werden um die Aufheizdauer am Wochenende beurteilen zu können und Widerstände bei den Mitarbeitern weitgehend zu vermeiden. Es wird erwartet, dass durch diese Maßnahme eine Energieeinsparung von 5-8 % erreicht werden kann.

9.6 KPB Mettmann

Das größte Problem bei der Beheizung bzw. Kühlung des Gebäudes stellt die Betonkernaktivierung in Verbindung mit einer Aufteilung der Heizkreise dar, welche nicht zu den Versorgungsanforderungen passt. Die Auswahl von drei Referenzräumen je Stockwerk ist nicht zielführend, da die Besonderheiten auf der West und Ostseite nicht richtig berücksichtigt werden können. Außerdem hat sich gezeigt, dass in den Referenzräumen bei geöffneten Fenstern falsche Ansteuersignale für den gesamten Heizkreis zur Folge haben. Ferner führen die über Heizungsthermostate raumweise anzusteuern- den Randzonen der Betonkernaktivierung im Kühlfall zu erheblichen Problemen.

Aus diesem Grund wurde nach einer ausführlichen Simulation der Verhältnisse für den Heizkreis West eine Umrüstung der betreffenden Räume vorgeschlagen. Diese sollte alle Ventile und eine raumweise Erfassung Innentemperaturen der entsprechende Räume ermöglichen. Zusammen mit einer prädiktiven Regelung, welche auch Wetterprognosen berücksichtigt, sollten damit die Probleme der Überwärmung weitgehend kompensiert werden. Hierfür wurde durch das ISE und die HAW nach Rücksprache mit PLENUM ein Umrüstungsvorschlag entwickelt.

Dieser sollte aus dem Fördermitteln für das Forschungsprojekt mit 40 % gefördert werden. Allerdings haben sich die Mitarbeiter nach 10 Jahren Betriebsdauer mit den Problemen der Überwärmung, teilweise werden 30 °C deutlich überschritten, arrangiert, so dass beim BLB keine Bereitschaft bestand hier tätig zu werden.

Der Betrieb der Wärmepumpe und des BHKWs erwiesen sich während der Laufzeit des Forschungsprojektes als fehleranfällig. Der Ausfall einzelner Komponenten konnte erkannt werden. Bis zu einer Behebung der aufgetretenen Fehler vergingen allerdings teilweise mehr als 18 Monate.

Die Vielzahl der aufgetretenen Fehler und deren weitgehende Behebung wird nachfolgend dargestellt.

9.6.1 Fehler

Tabelle 9.6-1: Relevante Fehler Kreispolizeibehörde Mettmann

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
1	Legionellenvorsorge nicht möglich, BHKW ausgefallen, Vorlauftemperatur Kessel nicht ausreichend, Hydraulikprobleme	Trenddaten - Regelbasierte Überprüfung	Reparatur BHKW	behoben
2	Kühlanforderung trotz Sollwert-Unterschreitung (Raum zu kalt). Ursache: Sollwert in GLT umgestellt, nicht auf DDC hochgeladen	Schaubild GLT	korrektes Hochladen der Sollwerte	behoben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
3	Dauerbetrieb Kesselpumpe: nach Wartungsarbeiten ist die Kesselpumpe in Dauerbetrieb obwohl nicht von GLT angefordert	Schaubild GLT	Handbetrieb deaktivieren	behoben
4	Falsch gewählte Zonen: Räume mit unterschiedlichen Lasten (Sonne, innere Quellen) werden in einer Zone / Heizkreis zusammen betrieben	Trenddaten / Dokumentation / Nutzer / Vor Ort - Analyse Betriebsdaten	Zoneneinteilung ändern	wird nicht behoben (Kosten)
5	Handbetrieb: BHKW Betriebssignal dauerhaft an, obwohl BHKW nicht in Betrieb	Trenddaten	Handbetrieb zurücksetzen	behoben
6	Pumpe Fußbodenheizung ausgefallen, Pumpenmodul + 1 Sicherung defekt	Monitoring - Korrelation Sollwert und Istwert Vorlauftemperatur	Reparatur	behoben
7	BHKW ausgefallen da Starterbatterie defekt	Trenddaten	Reparatur	behoben
8	Kessel moduliert nicht und läuft immer auf max. Leistung	Trenddaten	Regelstrategie anpassen: Regelung nach Vorlauftemperatur	wird nicht behoben (Kosten / Nutzen)
9	Abstimmung / Komponentendefekt: Die Wärmepumpe schickt im Sommer Kälte der Kältemaschine in die Geothermie.	Trenddaten - Betriebsdaten Kältemaschine	Reparatur	behoben
10	Zeitweise fällt die Lüftungsanlage 4 aus, bei tiefen Temperaturen wird sie ausgeschaltet. WRG Pumpe defekt, Regelung Umluftklappe defekt	Nutzerhinweis	Reparatur WRG Pumpe und Regelung Umluftklappe	behoben
11	Pumpe HK Nord ausgefallen, Bereich wird nicht mehr ausreichend versorgt	Trenddaten	Austausch Pumpe	behoben
12	BHKW Ausfall wg. Kühlmittelmangel / Ölmenge	Trenddaten	Reparatur	behoben
13	Rechner nicht stabil wg. Software von neuer USV	Datenabruf	Reparatur	behoben
14	Brandschutzklappen geschlossen, dadurch Ausfall Zellenlüftung	Trenddaten	Brandschutzklappen öffnen	behoben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
15	Der Volumenstrom auf dem Kompaktverteiler ist größer als der hinter dem Pufferspeicher. Ursache: nicht betriebene Pumpe P26 setzt sich fest und ist hoher Widerstand. Fehlende Rückschlagklappe im Bereich Mischkreis RLT1235	Trenddaten	Ausbau Pumpe, ggf. Einbau Rückschlagklappe	behoben
16	Keine Warmwasserversorgung. Ursache: Zirkulation wurde abgesperrt und nach Wartung nicht wieder geöffnet	Nutzerhinweis - Rückmeldung Haustechnik	Aufdrehen Absperrung	behoben
17	Befeuchter bringt keine Feuchtigkeit mehr in die Zuluft	Monitoring	Reparatur	behoben
18	Außentemperatursensor zeigt um 7K falschen Wert. Temporär ersetzt durch Zulufttemperaturfühler RLT04. Temperaturwert entspricht bei Umluftbetrieb nicht der Außentemperatur.	Nutzerhinweis	Reparatur	gemeldet
19	Pumpe Betonkern Heizkreis Nord war ausgefallen, weil die Sicherung für diese Pumpe ausgelöst hat	Monitoring	Sicherung zurücksetzen	behoben
20	Im Kühlbetrieb schließen die Zonenventile nicht, wenn der Raum zu kalt ist	Trenddaten	Regelstrategie anpassen	behoben
21	Wärmepumpe geht in Störung, wenn etwas längere Kälteanforderung besteht	Trenddaten	Reparatur	behoben
22	Keine Stabile Zulufttemperatur der Leitstelle, WRG, Erhitzer und Kühlung im Wechsel angeschaltet	Trenddaten	Regelstrategie anpassen	behoben
23	Vorlauftemperatur entspricht nicht mehr dem Sollwert.	Trenddaten	Wartung: Ventil bewegt und wieder auf Automatik gestellt	behoben
24	WRG läuft dauerhaft, auch bei ausgeschalteter Lüftungsanlage. Frostschutz auf sehr hohen Außentemperaturwert gesetzt (12 °C od. 14 °C)	Trenddaten / ISE	Regelparameter anpassen	behoben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
25	Ausfall Kältemaschine: die Abwärme kann wegen zu geringer Kühlleistung des Rückkühlers nicht aus dem Kreislauf gebracht werden.	Trenddaten	Umbau / Austausch Kühler	gemeldet
26	Zulufttemperatur auf Werten über 50 °C. Regler der Vorregelung der Zuluft defekt.	Trenddaten - Grenzwertüberprüfung	Reparatur	behoben
27	Schulungsraum Umluftkühler sollte nur während der Nutzung in Betrieb sein. Nutzer kann über Schalter den Umluftkühler schalten.	Nutzerhinweis	Nutzer darauf hinweisen	behoben
28	Zähler zählt nur auf einer Phase, auf allen 3 Phasen liegt Spannung an	Schaubild GLT	Reparatur	behoben
29	Nach Wartungsarbeiten setzt der Kessel die Regelung der DDC nicht um, Handbetrieb.	Trenddaten - Plenum Monitor	Handbetrieb deaktivieren	behoben
30	Pumpe P4 dauernd an obwohl nicht benötigt, Pumpe Hand ein	Trenddaten - Analyse Anlagenbetrieb	Pumpe in Automatikbetrieb setzen	behoben
31	Nach Pumpentausch wurde die BHKW-Pumpe auf volle Leistung eingestellt, dadurch zu hoher Volumenstrom und Solltemperatur wird nicht erreicht	Trenddaten	Pumpe niedriger einstellen	behoben
32	Pumpe Ausgefallen, Ursache: Defekt in Schalter in Schaltkasten	Trenddaten	Reparieren bzw. Tauschen	behoben
33	Mischkreis wird nicht warm obwohl Ventil 100% offen. Ursache: Pumpe P26 setzt sich zu und ist ein zu hoher Widerstand, Zwischenlösung: P26 angeschaltet. Dadurch hoher Durchfluss und Rücklauf-temperaturen	Trenddaten	Ausbau Pumpe	behoben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
34	Im Zellentrakt werden falsche Raumtemperaturen gemessen. Ursache ist eine fehlerhafte Platzierung der Fühler	Begehung & Messung	Hinweis an Nutzer und Betreiber	gemeldet
35	Die Zu- und Abluft im Zellentrakt ermöglichen keine angemessene Beheizung	Begehung	Hinweis an Nutzer und Betreiber	gemeldet

9.6.2 Maßnahmen

Während der Fehlererkennung und Betriebsanalyse der KPB Mettmann wurde eine Vielzahl von Fehlern identifiziert. Diese Fehler wurden den zuständigen Stellen gemeldet. Hierbei zeigte es sich, dass Maßnahmen, die von der Haustechnik vor Ort oder über den bestehenden Wartungsvertrag für die Regelungstechnik umgesetzt werden, konnten schnell durchgeführt werden. Auch gravierende Komponentendefekte, wie der Ausfall des BHKWs, wurden behoben.

Maßnahmen, die kleinere Defekte beheben, den Betrieb verbessern oder die Versorgungssicherheit erhöhen, werden vom Betreiber nicht veranlasst, solange es keinen ausreichenden Nachdruck seitens des Mieters gibt. So soll seit Januar 2016 eine Pumpe, welche ursprünglich für die ausgebaute Hydraulische Weiche benötigt wurde, durch ein Passstück ersetzt werden. Der Weiterbetrieb dieser Pumpe verursacht Mängel in der Beladung der Pufferspeicher und führt zu häufigeren Starts des BHKWs. Letztlich steigen durch das fehlende Passstück die Wartungs- und Instandhaltungskosten für das BHKW. Diese Untätigkeit ist auch ökonomisch nicht zu verstehen. Die Pumpe wurde im November 2017 ausgebaut.

Auch der fehlerhafte Aufbau des Pufferspeichers, welcher die Laufzeit des BHKWs stark verkürzte, wurde erst nach langer Zeit korrigiert.

Der Betrieb der Wärmepumpe ist immer noch fehlerhaft. Bei einer automatischen Umschaltung vom Kühl- in den Heizungsbetrieb kommt es immer wieder zu Störungen, welche bisher noch nicht behoben wurden. Ursache hierfür ist nach unserer Einschätzung eine mangelnde Abstimmung zwischen dem Rahmenvertragspartner des BLB und dem Lieferanten der Wärmepumpe.

Wird die Wärmepumpe im Kühlfall über einen längeren Zeitraum durchgehend betrieben, führt dies zu einer merklichen Absenkung der Raumtemperaturen. Allerdings werden die Kühlzeiten häufig von kürzeren Heizzeiten unterbrochen. Dies mindert den Effekt der Kühlung beträchtlich. Daraus ergibt sich, dafür das Einschalten der Heizung erst erfolgen darf wenn die gemittelten Außentemperaturen über einen Zeitraum mehrerer Tage eine Grenze von etwa 13 °C unterschreiten.

Ein weiterer Mangel ist dadurch gegeben, dass von der Anforderung Kühlen direkt in die Anforderung Heizen umgeschaltet wird. Zwischen beiden Anforderungen ist ein Zustand einzuschalten bei dem die Wärmepumpe weder die Anforderung Heizen oder Kühlen erhält die Mischkreise aber voll geöffnet sind. Auf diese Weise wird ein Temperaturengleich in den Heizkreisen Nord und Süd erreicht. Überschüssige Wärme aus der Südseite kommt der Nordseite zugute und Überschusswärme auf der Südseite wird abtransportiert.

Das direkte Umschalten zwischen Heizen und Kühlen führt auch zu einem erheblichen unnötigen Energieverbrauch, da die Masse des Betonkerns mit einer großen Wärmekapazität unnötig oft aufgeheizt und abgekühlt wird.

Der Stromzähler der Wärmepumpe liefert seit September 2014 keine zutreffenden Werte, da die Erfassung zweier Phasen ausgefallen ist. Trotz mehrmaliger Anmahnung ist keine Reparatur erfolgt. Eine Bilanzierung des Wirkungsgrades der Wärmepumpe ist daher nicht möglich.

9.6.2.1 Änderungen an der Betonkernaktivierung

Bisheriger Zustand

Aus bauphysikalischer Sicht ist der sommerliche Wärmeschutz des Gebäudes, als Folge eines fehlenden äußeren Sonnenschutzes, nicht gewährleistet. Darüber hinaus weist das Gebäude gravierende Mängel bei der Konzeption der Betonkernaktivierung auf. Bei der derzeitigen Betriebsweise können die Anforderungen an das Raumklima nach DIN 15251 in keiner Weise eingehalten werden. Die Mängel der Betonkernaktivierung im derzeitigen Zustand stellen sich wie folgt dar:

- Die Einteilung der Heizkreise passt nicht zu der Orientierung des Gebäudes. Dies ist für den Kreis West besonders gravierend, da er nach Norden, Westen und Süden orientierte Räume umfasst.
- Es kann entweder nur geheizt oder gekühlt werden. In den nach Norden ausgerichteten Räumen muss möglicherweise noch geheizt werden, wenn in den nach Süden ausgerichteten Räumen schon gekühlt werden müsste. Dies ist aber bei der derzeitigen Ansteuerung nicht möglich.
- Im Kühlfall können die Randzonen, durch die Verwendung von Thermostatventilen, welche für den Heizfall konzipiert sind, nicht genutzt werden.
- Die Trägheit der Betonkernaktivierung ermöglicht derzeit keine gezielte Dämpfung der Temperaturanstiege als Folge der äußeren Einstrahlung.
- 'Fehler' in der Nutzung eines Referenzraumes, etwa durch geöffnete Fenster, führen zu einer fehlerhaften Ansteuerung aller Ventile des entsprechenden Heizkreises in der jeweiligen Etage.
- Besonders problematisch sind derzeit die Auswirkungen auf der Westseite und der Ostseite des Gebäudes. Allerdings werden sie derzeit nur auf der Westseite nachgewiesen weil es dort auf jeder Etage einen Referenzraum gibt.

Verschärft werden diese Mängel durch eine unbefriedigende Entscheidung zur Umschaltung von einem Heizbetrieb in einen Kühlbetrieb und umgekehrt und häufige Defekte beim Betrieb der Wärmepumpe. Versuche die Aufheizung der Räume durch das Anbringen von Sonnenschutzfolien zu verringern waren nicht erfolgreich.

Vorschlag zur Änderungen der Ansteuerung

Modellhafte Untersuchungen des ISE zeigen, dass durch eine verbesserte Ansteuerung der Betonkernaktivierung der Temperaturanstieg verringert und die Komfortkriterien wesentlich besser eingehalten werden können. Die erforderlichen Änderungen betreffen zwei Bereiche. Einerseits muss die globale Ansteuerung in Bezug auf die

Entscheidung ob geheizt oder gekühlt werden soll und welche Vorlauftemperaturen benötigt werden, verbessert werden. Andererseits soll für die betroffenen Räume die Ansteuerung des Betonkerns und der Randstreifen auf der Basis einer Einzelraumregelung erfolgen.

Die Umrüstung soll zunächst den Kreis West betreffen. Dort sind auf einer Etage jeweils 7 Räume mit einer Betonkernaktivierung und den dazugehörigen Randstreifen betroffen. Die Anzahl der Etagen, welche in die Umrüstung einbezogen werden, richtet sich nach den Umrüstungskosten, welche noch zu ermitteln sind. Die notwendigen Umbaumaßnahmen wurden unter der Maßgabe möglichst geringer Nachrüstkosten ausgewählt.

- Betonkern und Randstreifen erhalten jeweils ein über Funk ansteuerbares Regelventil.
- In jedem Raum wird ein Raumtemperaturfühler auf der Basis der enocean-Technologie montiert, welcher auch eine, vom jeweiligen Nutzer einstellbare Solltemperatur übermittelt. Die enocean-Technologie ermöglicht es Fühler und Aktoren mit ausreichend Energie auf der Grundlage von Photovoltaik zu versorgen. Auf eine aufwendige Verkabelung kann verzichtet werden.
- Zusätzlich wird an den Fenstern ein Fühler angebracht, welcher, ebenfalls mittels enocean-Technologie, signalisiert ob ein Fenster geöffnet oder geschlossen ist.
- Die Abfrage der Informationen und die Ansteuerung der Ventile über Funk erfolgt aus den Flurbereichen. Der Verkabelungsaufwand wird minimiert.
- Die vorhandene Verkabelung zur Ansteuerung des Betonkerns wird zur Energieversorgung der Ventile genutzt.

Modellierung durch ISE

Zur Vorbereitung der Umrüstung erfolgte eine vertiefte Modellierung durch das ISE in Freiburg. Diese Berechnungen wurden im Rahmen von OBSERVE ohne Belastungen für den BLB vorgenommen. Die Berechnungen verdeutlichten welche Möglichkeiten bestehen, durch einen gezielten Einsatz der Hauptflächen und der Randstreifen den Temperaturanstieg zu minimieren. Insbesondere wurden die Möglichkeiten, welche sich aus der 'zeitlich richtigen' Ansteuerung der Ventile in Bezug auf die jeweilige Orientierung der Räume ergeben, dargestellt. Weiterhin wurde untersucht, welche Möglichkeiten die gezielte Ansteuerung der Randstreifen bietet um auch auf kurzfristige Wettervorhersagen in Bezug auf unterschiedlich orientierte Räume zu reagieren.

Die Berechnungen wurden unter Verwendung von Wetterdaten aus einem TRY durchgeführt, da damit rechnerisch eine optimale Vorhersage möglich wird.

Eine genaue Beschreibung der am Fraunhofer ISE durchgeführten Berechnungen zur Optimierung der Betonkerntemperierung findet sich im Arbeitspaket A.3

Entwicklung Regler durch die HAW

Nach Beschluss des Umbau seitens des BLB war die Erweiterung der vorhandenen Regelung geplant. Dazu sollte eine Abstimmung zwischen HAW und Delta Controls stattfinden, um die Übernahme der Reglerstrukturen in die Steuerung von Delta Controls zu klären.

Die Entwicklung der Regler wurde in zwei Schritten vorbereitet.

1. Entwurf Regler für Einzelräume
2. Entwurf Koordinationsregler

Die Einzelraumregler bestimmen die Ventilstellung aus den Vorlauf-, Raum- und Solltemperaturen und sind erweiterbar um die durch die Koordinationsregelung bereitgestellten Signale. Die modellbasierte, prädiktive Koordinationsregelung bestimmt aus den aktuellen Messwerten und Wetterprognosedaten mit Hilfe eines Modells die optimale Schaltfolge für Heiz- und Kühlbetrieb, sowie die Soll-Vorlauftemperaturen. Nachdem der Umbau war geplant, die mit dem neuen System erzeugten Messdaten (idealerweise über drei Jahreszeiten Winter, Frühjahr und Sommer) für Identifikation von Modellparametern zu nutzen. Hierbei sollte die Firma IngSoft bei der Erkennung von Fensteröffnungsperioden zusätzliche Informationen liefern.

Planung Umbau

Durch PLENUM wurde mit Delta Controls bei einem Ortstermin in Mettmann geklärt, welcher Aufwand mit dem Einbau funkgesteuerter Ventile für den Betonkern und den Randstreifen, die Installation von Raumtemperaturfühlern mit Sollwertvorgabe sowie dem Einbau von Fühlern für die Öffnung der Fenster, basierend auf der enocean-Technologie verbunden ist. Zusätzlich wurde der Aufwand für den Umbau der Ansteuerung, sowohl global als auch lokal, kalkuliert.

Abhängig von den so ermittelten Kosten sollte anschließend die Umrüstung von einer oder mehreren Etagen geplant werden. Die gesamten, in Verbindung mit OBSERVE förderfähigen Kosten (40 %) sollten ca. 100.000 € nicht überschreiten. Eine Entscheidung über den Umbau sollte durch den BLB im Herbst 2015 fallen, damit eine ausreichende Zeit für die Umsetzung und Optimierung im Rahmen von OBSERVE zur Verfügung stand.

Mangels Druck durch den Mieter hat sich der BLB entschlossen die vorgeschlagene Umrüstung nicht durchzuführen.

Umrüstung freie Kühlung

Die Kühlung könnte, insbesondere in den Übergangsjahreszeiten, durch eine freie Kühlung während der Nachtstunden erfolgen. Dies würde einerseits den Energieverbrauch für den Antrieb der Wärmepumpe senken und andererseits würde der Boden weniger aufgeheizt, was wiederum den Wirkungsgrad der Wärmepumpe im noch erforderlichen Kühlbetrieb steigert und den Stromverbrauch senkt. Der vergrößerte Rückkühler würde auch einen fehlerfreien Betrieb der Kältemaschine ermöglichen.

Die Umrüstung wurde durch den BLB nicht beauftragt.

9.7 Schule Sterntalerstraße

Im Zeitraum 2003-2004 wurde die Dämmung der Verwaltung (Wände, Fenster und Dach) saniert und auf das damalige EnEV-Niveau angehoben. Gleiches galt für die Dächer der Sporthalle und deren Nebengebäude, außerdem wurden die Fenster der Nebengebäude und das Fensterband auf der Nordseite saniert.

Im Rahmen der Bundesförderung Investitionspakt Energetische Sanierung 2008/2009 wurde die Schule in den Jahren 2011/2011 umfassend saniert. Um die Auswirkung unterschiedlicher Maßnahmen beurteilen zu können, wurden die Gebäude mit einer umfangreichen Messtechnik ausgestattet und ein Monitoring aufgebaut, welches rund 1000 Datenpunkte erfasst. Basierend auf dieser umfangreichen Messtechnik war es möglich, die Auswirkung verschiedener Maßnahmen auf die Energieeinsparung und den Komfort zu beurteilen und insbesondere beim Stromverbrauch erhebliche Einsparungen zu erzielen.

Mit dem umfassenden Datenbestand ist es möglich, sowohl die Entwicklung der Gesamtverbräuche von Wärme und Elektrizität darzustellen, als auch die Auswirkung einzelner Maßnahmen zu beurteilen.

Da als Folge der Bundesförderung auch Maßnahmen ergriffen wurden, welche sonst nicht möglich gewesen wären, können auch allgemeine Hinweise für effiziente Sanierungen abgeleitet werden. Diese Schlussfolgerungen werden in Kapitel 9.7.5 dargestellt und diskutiert.

Es wurden die Klassengebäude, die Pausenhalle und der Musikraum mit einem Vollwärmeschutz versehen. Zusätzlich wurden in der Sporthalle das Mauerwerk, die Betonstützen und die Verglasung der Südseite saniert. Die Klassengebäude wurden mit einer mechanischen Belüftung mit Wärmerückgewinnung sowie einer passiven Nutzung der Geothermie zur Beheizung und Kühlung ausgerüstet. In der Pausenhalle und dem Musikraum wurde die vorhandene Lüftungsanlage saniert und mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet.

Eine Solaranlage auf der Sporthalle soll vorrangig den Warmwasserverbrauch für die Duschen und die Kantine im Klassenhaus 1 bereitstellen. Überschüssige Wärme sollte nach Möglichkeit in das Fernwärmenetz von Vattenfall zurückgespeist werden.

Bei dem Vergleich mit dem Energieverbrauch ist zu berücksichtigen, dass die Änderungen in der Nutzung wie der Einführung einer gesicherten Ganztagesbetreuung, der Einbau einer Kantine, zusätzliche Maßnahmen zur Telekommunikation und Brandüberwachung sowie der technische Ausbau in den Klassengebäuden wie der Einsatz von Smartboards den Stromverbrauch erhöht haben. Letztendlich verursacht auch die umfassende Messtechnik einen nicht vernachlässigbaren Stromverbrauch.

9.7.1 Fehler

In der Schule Sterntalerstraße wurden während der Projektlaufzeit durch automatische Regelüberprüfung, manuelle Überprüfung von Trendlogs, Scatterplots und GLT-Schaubildern, Rückmeldungen der Nutzer sowie zusätzliche Messungen zahlreiche Fehler im Anlagenbetrieb erkannt. Sie konnten in der Folge behoben werden. Eine Übersicht ausgewählter Fehler ist in Tabelle 9.7-1 gegeben. Zusätzlich wurden zahlreiche Optimierungsvorschläge für den Anlagenbetrieb erarbeitet und umgesetzt.

Zusätzlich wurden im laufenden Monitoring verschiedene Möglichkeiten zur Optimierung des Anlagenbetriebs festgestellt. Die während der Projektlaufzeit umgesetzten Optimierungen, welche sowohl im Anlagenbetrieb als auch in der Programmierung der GLT durchgeführt wurden, sowie Fehlerbehebungen welche über die Wiederherstellung des Ausgangszustand hinaus gehen, werden im Unterkapitel 9.7.2 beschrieben.

Tabelle 9.7-1: Relevante Fehler Schule Sterntalerstraße

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
1	Ausfall Solarthermie	Regelüberprüfung	Reparatur	ja
2	Heizkurve Lüftung Sporthalle zu niedrig	Analyse des Stromverbrauchs	Heizkurve angepasst	behoben
3	Dauerbetrieb Warmwasserbereiter Küche	Regelüberprüfung	Reparatur	behoben
4	Defekte Motorventile an statischen Heizungen	Hinweis Hausmeister	Reparatur und Veränderung der Installationsposition	teilweise
5	falsch skaliertes Stromzähler	Trenddatenanalyse	Installation des Zählers korrigieren	behoben
6	Mehrfacher Ausfall Geothermie	Grenzwertüberwachung Druck	Reparatur	behoben
7	Raumtemperaturen Klassenräume zu niedrig	Nutzerhinweise	Sollwerte erhöht	behoben
8	Laufzeit Umluftkühler Lagerraum Küche	Trenddatenanalyse	Sollwert von 8 °C auf 22 °C erhöht	behoben
9	Spüllüftung Pausenhalle am Wochenende	Leistungsmessung	Anpassung der GLT	behoben
10	Durchfluss Speicherladung über FW zu hoch	Trenddatenanalyse	Einstellen des Taco-Setters	behoben
11	Fehlerhafte Einbauposition von WMZ	Begehung	Korrektur der Einbauposition	behoben
12	Laufzeiten Lüftung Pausenhalle zu lang	Überprüfung Sollwerte GLT	Sollwerte erhöht	behoben
13	Ausfall der Versorgung Sporthalle	Analysen der Trenddaten	Verstellen von Grenzwerten des Reglers	teilweise
14	Wassermenge Fernwärme	Scatterplot	gesenkt	behoben
15	Vorlauftemperatur Fernwärme zu niedrig	Scatterplot	kostenneutrale Erhöhung der Wassermenge durch Versorger	indirekt

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
16	Zu hoher Differenzdruck Fernwärme	Grenzwertüberwachung	Versorger informiert	teilweise
17	Spüllüftung Haus 2 nach Neuprogrammierung fehlerhaft	Trenddatenanalyse	Programmierfehler behoben	behoben
18	Diverse Ausfälle von Controllern	Grenzwertüberwachung	Neustart oder Austausch	behoben

9.7.1.1 Ausfall der Geothermie in Haus 5

Alle Geothermiesonden in der Schule Sterntalerstraße unterliegen einem langsamen Druckverlust. Der Verlauf der Drücke seit 2014 ist in Abbildung 9.7-1 zu sehen. Aufgrund des starken Druckverlustes der Geothermie in Haus 5, wurde diese im Oktober 2015 abgestellt. Im Mai 2017 wurde schließlich die Geothermie wieder aufgefüllt und der Vorerhitzer in der Luffterwärmung wieder in Betrieb genommen. Dadurch entstand

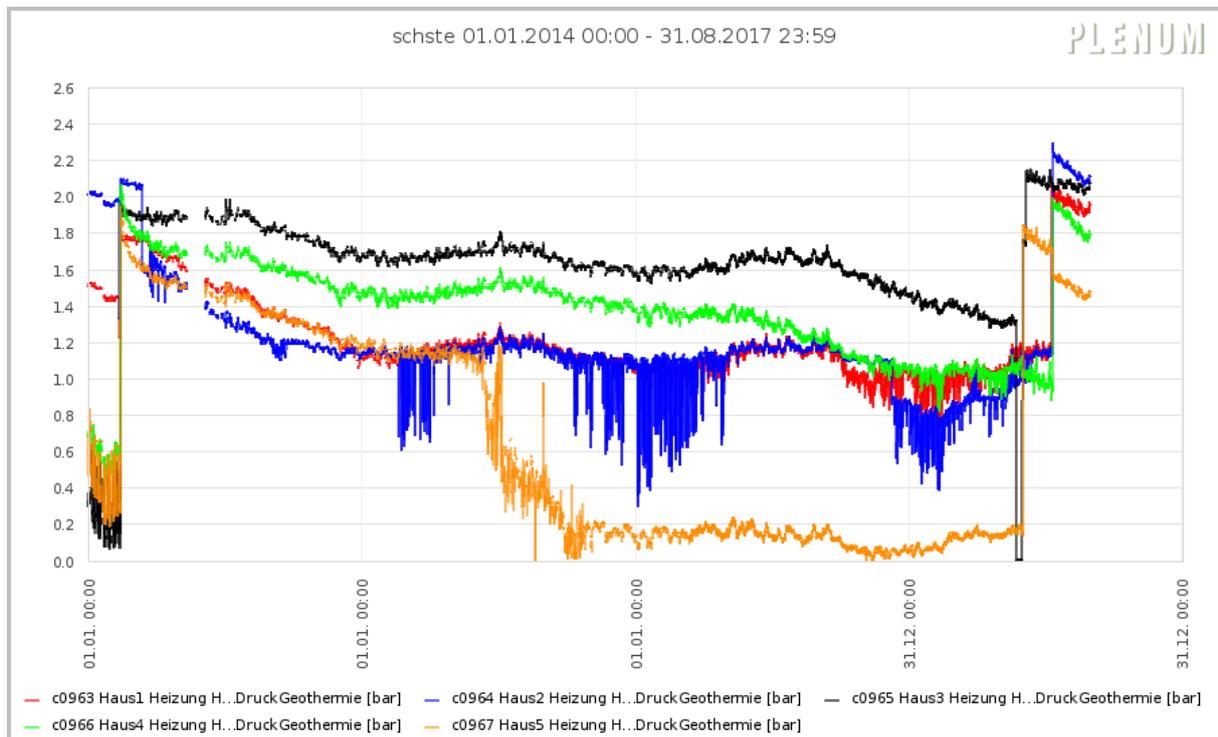


Abbildung 9.7-1: Entwicklung der Drücke in den Geothermiesonden der Klassenhäuser 1 bis 5 vom 1.1.2014 bis zum 31.8.2017. Der Ausfall der Geothermie von Haus 5 aufgrund von zu niedrigem Druck (orange) ist deutlich zu erkennen.

ein Zeitraum von über 18 Monaten, in dem die Lüftungsanlage von Haus 5 ohne den mit Geothermie betriebenen Vorerhitzer stattfand. Die gesamte Luffterwärmung fand durch die Wärmerückgewinnung und den mit Fernwärme betriebenen Nacherhitzer statt, so dass sich die Möglichkeit ergab den Einfluss des Vorerhitzers zu betrachten.

Zum Vergleich wurden die Zeiträume ab dem 10.10.2014 bzw. dem 05.10.2015, jeweils für 182 Tage, welches nahezu der gesamten Heizperiode entspricht, betrachtet. Im früheren Zeitraum lief die RLT im Normalbetrieb, d.h. es fand zuerst eine Vorerhitzung der Außenluft über die Geothermie statt, dann eine weitere Erwärmung über die

Wärmerückgewinnung und schließlich eine Nacherwärmung mittels des fernwärmegepeisten Heizregisters. Im späteren Vergleichszeitraum fand keine Vorerwärmung der Luft über die Geothermie statt.

Eine interessante Fragestellung die sich an diesem Beispiel untersuchen lässt ist, wie sich der Ausfall der Geothermie auf die Wärmerückgewinnung auswirkt.

Hierzu wurde die über die Wärmerückgewinnung aus der Abluft gewonnene Wärme mittels einer Wärmebilanz auf der Abluftseite der Wärmerückgewinnung bestimmt:

$$Q_{WRG} = (T_{AB} - T_{FO}) \dot{V} \rho c_p$$

Der Volumenstrom \dot{V} wurde dabei mit den bei Abnahme gemessenen 500 m³/h pro belüftetem Klassenraum angenommen, Dichte und Wärmekapazität wurden als konstant angenommen. Die Temperatur der Ab (T_{AB}) und Fortluft (T_{FO}) stehen als Minutenwerte zur Verfügung.

Die gemessenen Heizleistungen sowie die berechnete Leistung der Wärmerückgewinnung sind in Abbildung 9.7-2 grafisch dargestellt. Die sich daraus ergebenden Verbräuche sind in Tabelle 9.7-2 zusammengefasst.

Tabelle 9.7-2: Heizenergie Haus 5, absolut und anteilig. Im Winter 2014/15 war die Geothermie in Betrieb im Winter 2015/16 ausgefallen.

	Winter 2014/15		Winter 2015/16	
	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]
statische Heizung (Fernwärme)	21.990	77	20.890	73
Summe RLT	6210	23	7810	27
Geothermie	1090	4	0	0
Wärmerückgewinnung	3500	13	4760	17
Nacherhitzer (Fernwärme)	1630	6	2990	10

Die Analyse ergibt, dass die RLT insgesamt nur einen geringen Anteil von 23-27% an der Wärmeversorgung des Klassenhauses hat. Die Geothermie wiederum hat nur einen geringen Anteil an der Heizleistung der Lufterwärmung. Während ihres Ausfalls übernimmt die Wärmerückgewinnung einen Großteil der Heizleistung der Geothermie, so dass die zusätzlich durch den Nacherhitzer und damit die Fernwärme zu erbringende Heizleistung deutlich geringer ist als der Ausfall der Geothermie zuerst vermuten lässt. Dies zeigt auch der Vergleich der Rückwärmzahlen der Wärmerückgewinnung mit und ohne Geothermie. Die Rückwärmzahl betrug in dem Vergleichszeitraum mit dem Betrieb der Geothermie im Mittel 0,52, d.h. es wurden 52% der zur Verfügung stehenden Wärme aus der Abluft genutzt. Nach Ausfall der Geothermie, stieg die Rückwärmzahl auf 0,61. Dies bedeutet, dass durch den Ausfall des Vorerhitzers kältere Zuluft in die Wärmerückgewinnung strömt, wodurch diese in den einen größeren Teil der Wärme aus der Abluft Nutzen kann und damit Effizienter läuft.

Die Rückwärmzahl Φ berechnet sich, bezogen auf die Fortluft, zu

$$\Phi = \frac{T_{Ab} - T_{Fort}}{T_{Ab} - T_{Außen}}$$

Ein weiterer Vorteil beim Betrieb der Geothermie ist die Kühlung der Zuluft bei hohen Außentemperaturen. Dies ist exemplarisch in Abbildung 9.7-3 dargestellt.

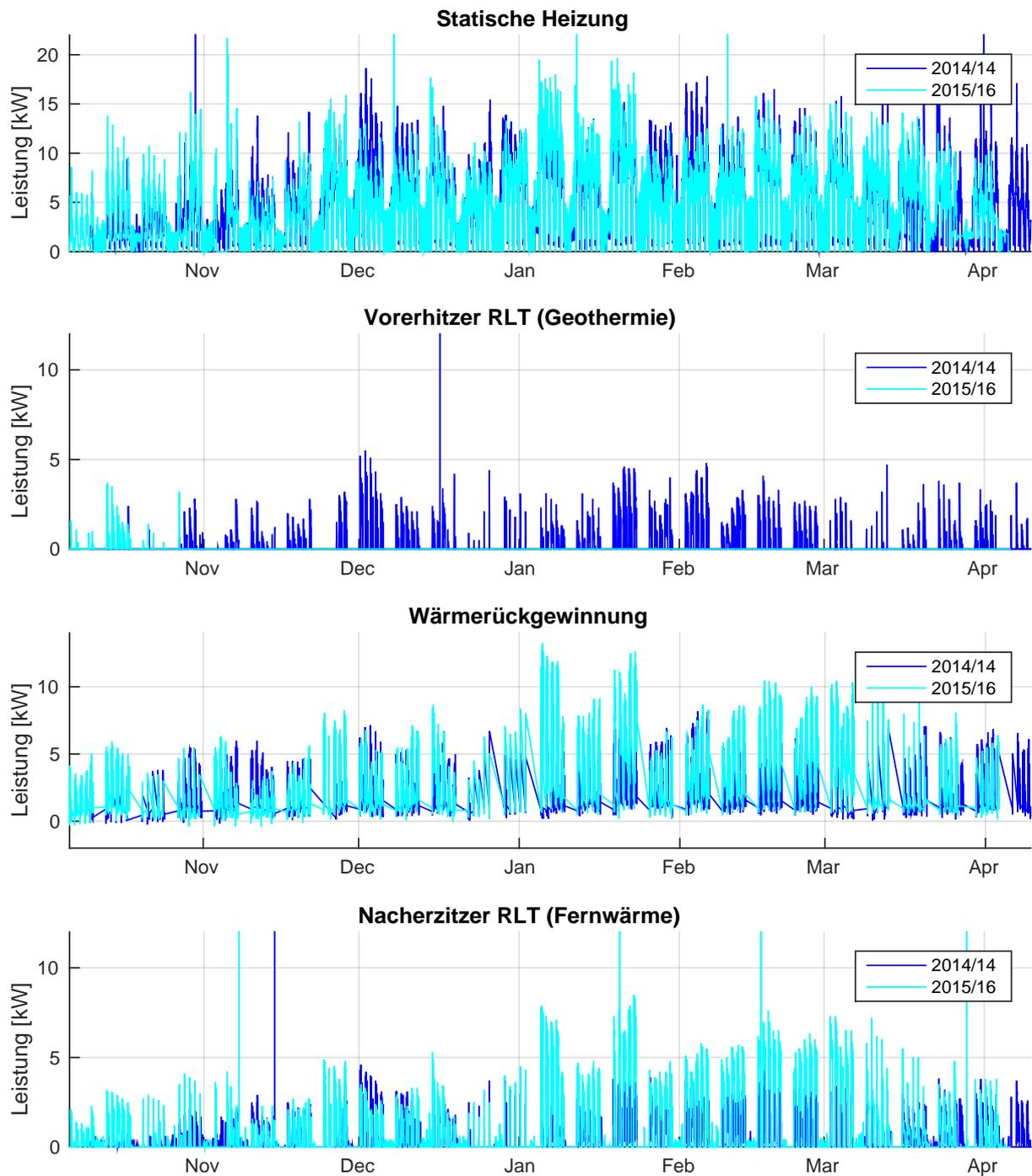
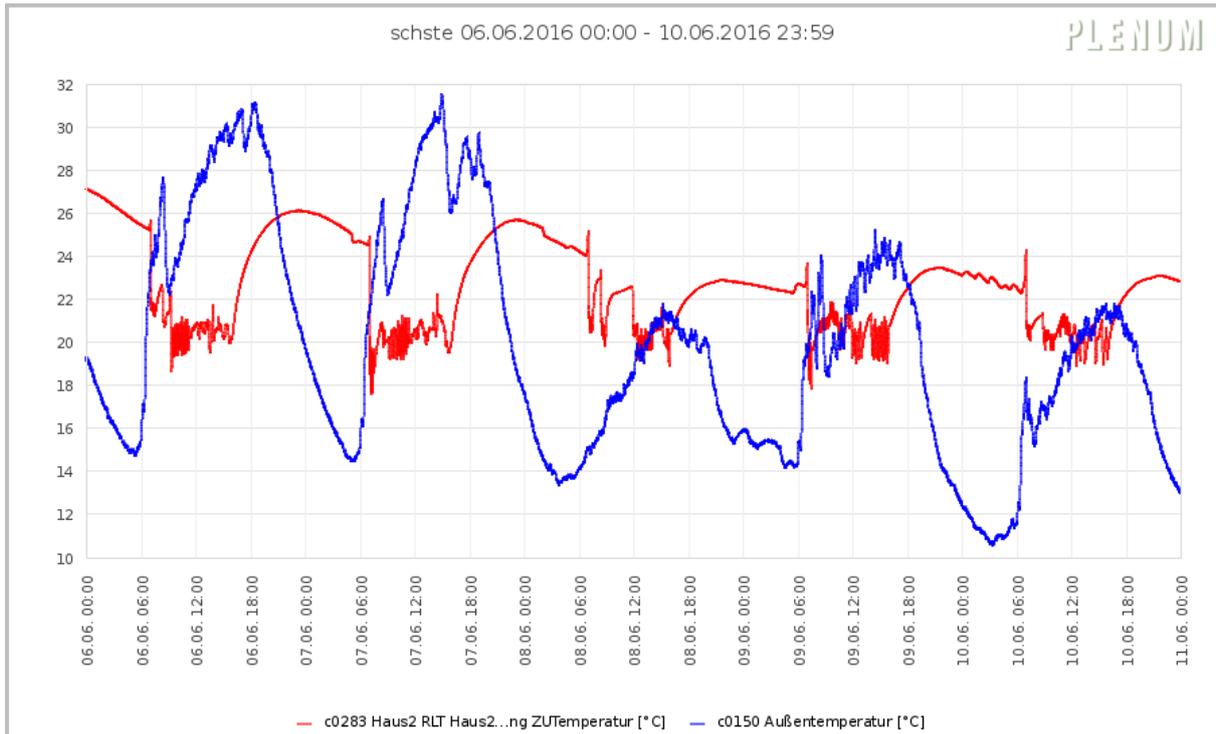
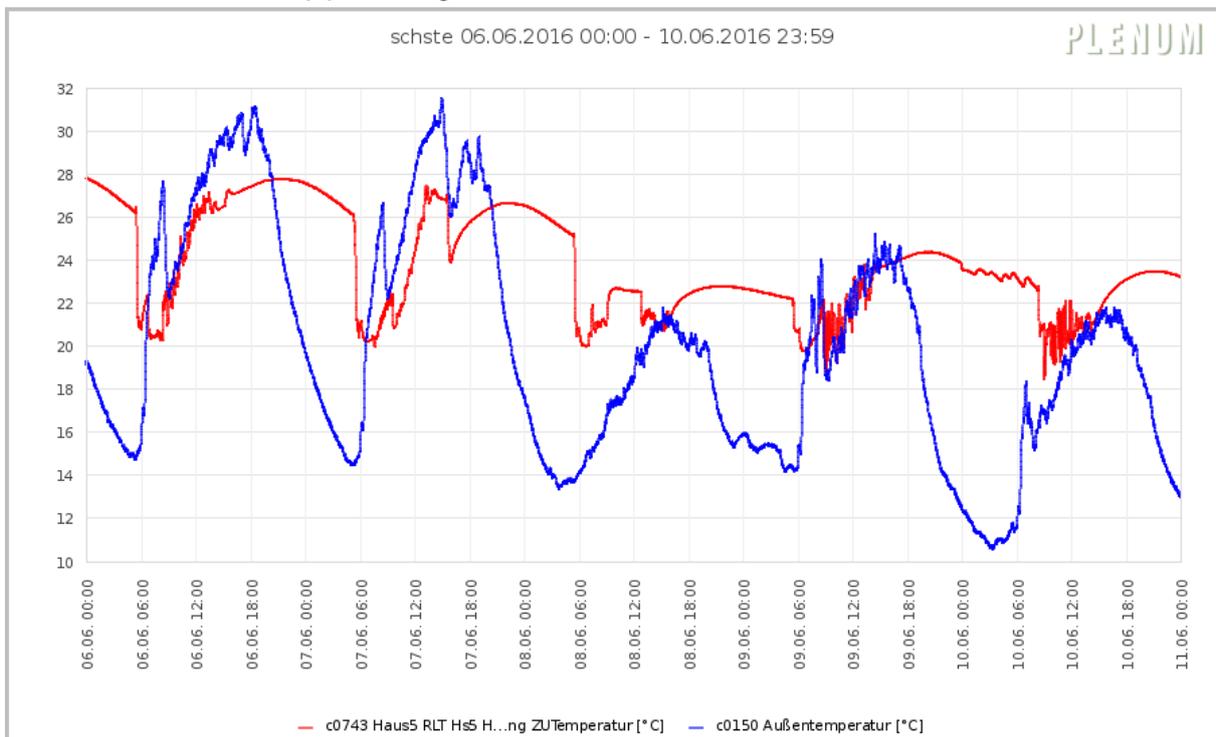


Abbildung 9.7-2: Heizleistungen Haus 5 10.10.2014 bis 9.4.2015 (blau) und 5.10.2015 - 3.4.2016 (cyan).
 Der Ausfall der Geothermie ab November 2015 sowie die damit einhergehenden Erhöhung der Leistung in Wärmerückgewinnung und Nacherhitzung sind in den Leistungsverläufen zu sehen.



(a) Kühlung der Zuluft mit Geothermie in Haus 2



(b) Auffall der Geothermie, daher keine Kühlung der Zuluft im selben Zeitraum

Abbildung 9.7-3: Die Zulufttemperatur (rot) liegt in Haus 2 durch den Einsatz der Geothermie während der Nutzungszeit an den beiden warmen Tagen (6.-7.6.2016) deutlich unter der Außentemperatur (blau). In Haus 5 folgt die Temperatur der Zuluft im selben Zeitraum der Außentemperatur.

9.7.1.2 Regelung der Vorlauftemperatur Heizkreis Klassenhäuser

Die Regelung der Vorlauftemperatur des Heizkreises Klassenhäusern führt bei niedrigen Durchflüssen zu starken Vorlauftemperaturschwankungen, wie die Abbildung 9.7-4 zeigt.

Eine Ursache ist der immer noch zu hohe Differenzdruck auf Seiten der Fernwärme. Zusätzlich ist aber auch die Geschwindigkeit des Ventils zu niedrig.

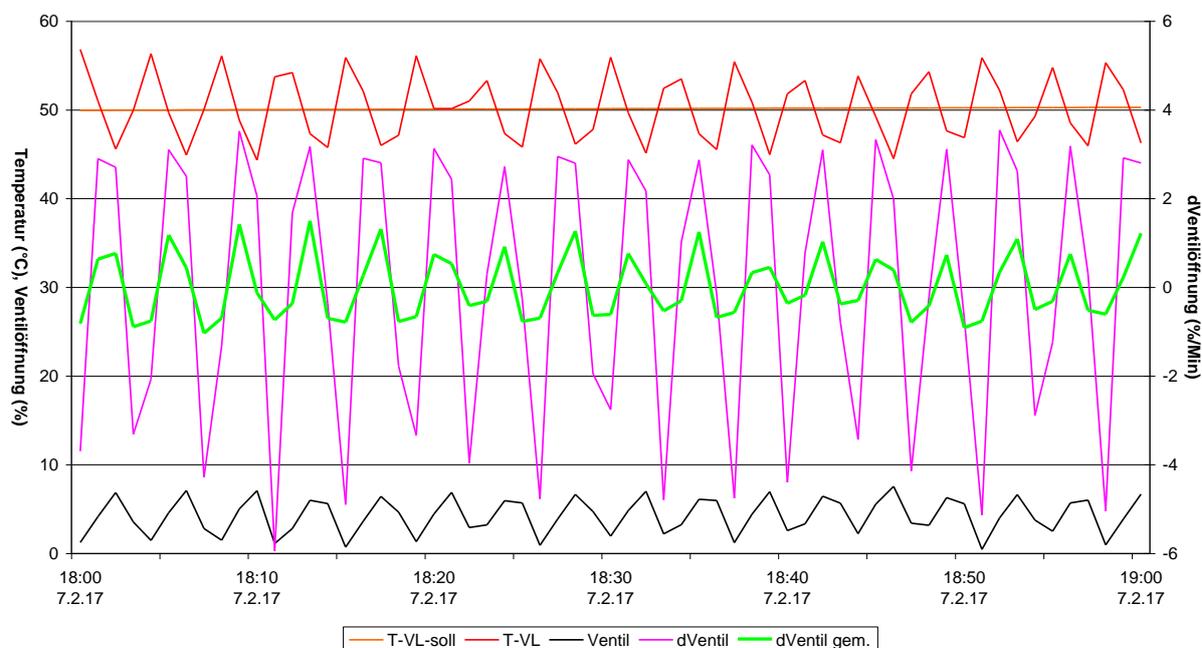


Abbildung 9.7-4: Verlauf der Vorlauftemperatur (rot) im Heizkreis Klassenhäuser am 7.2.2017 von 18-19 Uhr. Es wird nicht auf die Solltemperatur (orange) ausgeregelt sondern das Ventil (schwarz) fährt ständig auf und zu, d.h. der Regelkreis schwingt.

9.7.2 Maßnahmen

In der Schule Sterntalerstraße wurden während der Laufzeit des Projekts Observen zahlreiche Maßnahmen zur Senkung der Energiebedarfs sowie zur Erhaltung und Steigerung des Nutzungskomforts durchgeführt. Die Hinweise hierfür ergaben sich sowohl aus der laufenden Fehlererkennung, der manuellen Analyse von Trendlos, sowie gezielt vorgenommene Messungen. Dabei deckte insbesondere eine umfangreiche Leistungsmessung in der Stromverteilung zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten auf, von denen in der Folge viele umgesetzt wurden. Der vollständige Bericht der elektrischen Leistungsmessung befindet sich im Appendix C.

Die Maßnahmen, welche sich mit Hilfe der Messdaten quantifizieren ließen sind in Tabelle 9.7-3 aufgelistet. Als Folge der geringeren Wärmeabnahme und einer besonders großen Temperaturspreizung bei der Fernwärme, die Rücklauftemperaturen lagen in der Regel unter 35 °C, konnte die Anschlussleistung um 1000 l/h gesenkt werden.

Tabelle 9.7-3: Zusammenfassung der erzielten Einsparungen. Die Preise (Brutto) von 2017 betragen 21,48 Cent/kWh elektrisch, 7,36 Cent/kWh Fernwärme (Arbeitspreis) und 7,616 Cent/l/h/a Fernwärme (Leistungspreis).

Maßnahme	Einsparung [kWh/Jahr]	[EUR/Jahr]
Entfernen von Gefrierschränken aus dem Lager- raum Küche Haus 1	9.800	2.110
Abstellen der Spüllüftung Pausenhalle/Musikraum	1.670	360
Abstellen der Spüllüftungen Klassenhäuser 1-5 von Di.- Fr.	720	160
Änderung Sollwert Kühlung Lagerraum Küche Haus 1	420	90
Änderung Vorlauftemperatur RLT Sporthalle	720	160
Summe	13.330	2880
Einsparung Grundpreis Fernwärme		
Reduzierung der Anschluss- leistung [l/h]	1000	7.620

9.7.2.1 Entfernen von Gefrierschränken aus dem Lager der Aufwärmküche

Als Folge des Berichts zum Stromverbrauch wurden von den im Lager der der Aufwärmküche aufgestellten Gefrierschränken im Sommer 2015 alle bis auf einen außer Betrieb genommen. Dadurch wurde die Grundlast des Haus 1 von 1,741 kW auf 0,623 kW gesenkt, was einer jährlichen Einsparung von 9794 kWh entspricht und damit die von uns erwartete jährliche Einsparung in Höhe von 4630 kWh deutlich übertrifft. Die angenommene Einsparung basierte auf der Entfernung eines Gefrierschranks, tatsächlich wurden jedoch 2 von 3 Gefrierschränken entfernt. Die Ermittlung der Grundlast wurde jeweils an Wochenenden ohne Nutzung durchgeführt und ist in Abbildung 9.7-5 dargestellt.

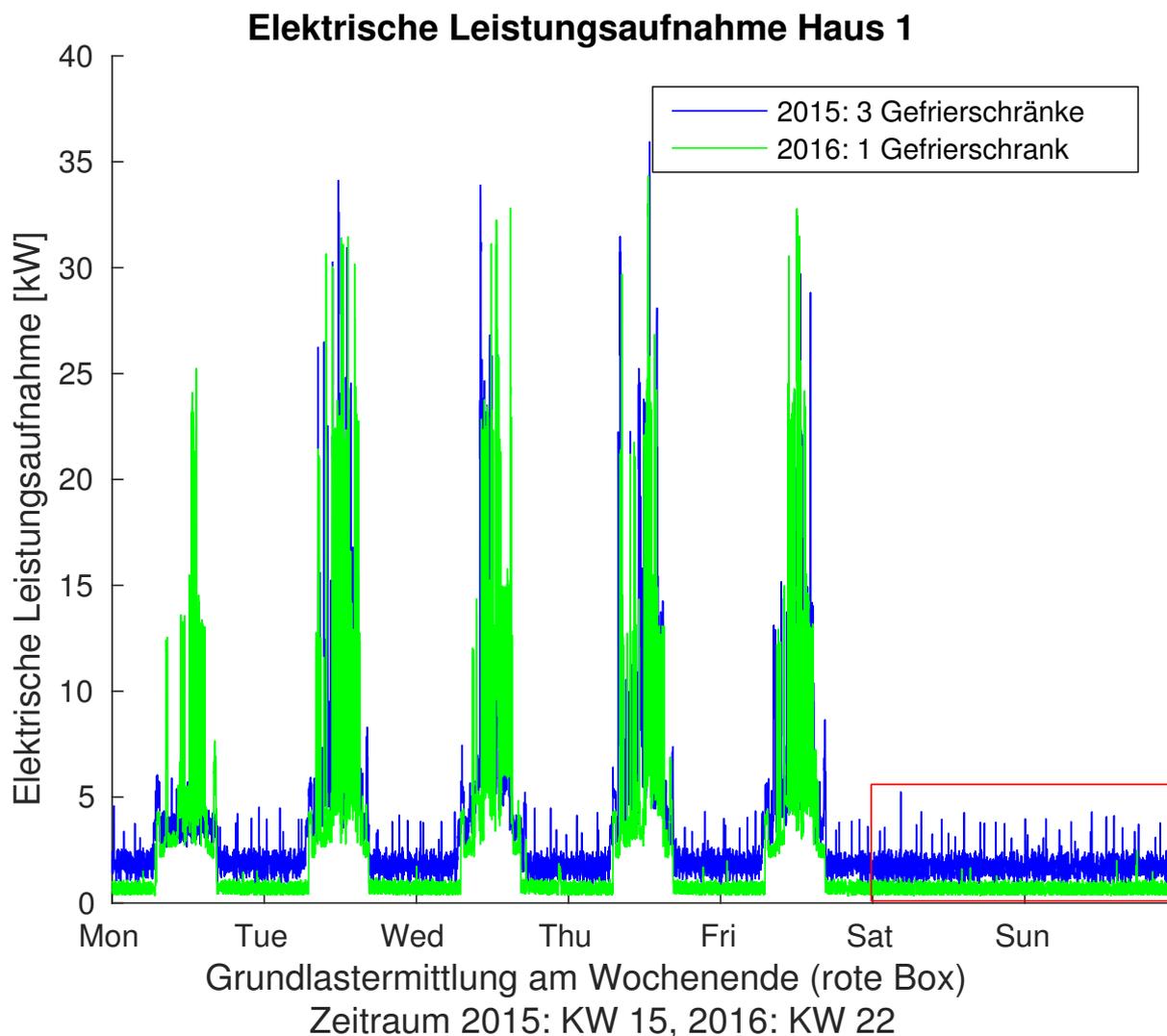


Abbildung 9.7-5: Die Grundlast wurde jeweils an Wochenenden ohne Nutzung ermittelt. Der Zeitraum zur Ermittlung der Grundlast vor Abschaltung der Gefrierschränke ist der 11.-12.4.2015, der Verbrauch ergibt sich aus der von uns durchgeführten Leistungsmessung. Die Grundlast nach der Abschaltung wurde vom 04.-05.6.2016. unter Verwendung des inzwischen funktionstüchtigen Stromzählers von Haus 1 ermittelt.

9.7.2.2 Anhebung des Sollwertes der Kühlung Lagerraum Haus 1

Wegen der hohen Abwärme der Gefriergeräte wurde in dem Lagerraum der Küche in Haus 1 eine Umluftkühlung installiert. Diese wird durch die Geothermie versorgt, so dass lediglich elektrische Hilfsenergie für Geothermie und Gebläse benötigt werden. Nach dem Entfernen der Kühlschränke wurde durch den Hausmeister jedoch festgestellt, dass die Kühlung trotz akzeptabler Raumtemperatur ständig läuft. Durch eine Begehung wurde festgestellt, dass der Sollwert der Kühlung bei 12 °C lag, was weder notwendig noch mit der Kühlung über die Geothermie erreichbar ist. Infolgedessen lief die Kühlung durchgehend, ohne den Sollwert zu erreichen. Seit dem Anheben des Sollwertes auf 22 °C am 25.7.2016 um 11:30 läuft die Pumpe nur noch bei Raumtemperaturen welche tatsächlich zu hoch sind.

Die Bilanzierung erfolgte über einen Zeitraum 24 Stunden vor- und nach Änderung des Sollwertes am 25.7.2017 um 11:30 Uhr. Da beide Tage in den Sommerferien liegen

fand keine anderweitige Nutzung statt. Die Extrapolation des Durchschnittsverbrauchs an diesen beiden Tagen ergibt eine jährliche Ersparnis von 420 kWh. Da der Vergleich im Hochsommer stattfand ist anzunehmen dass die tatsächliche jährliche Ersparnis höher ausfällt.

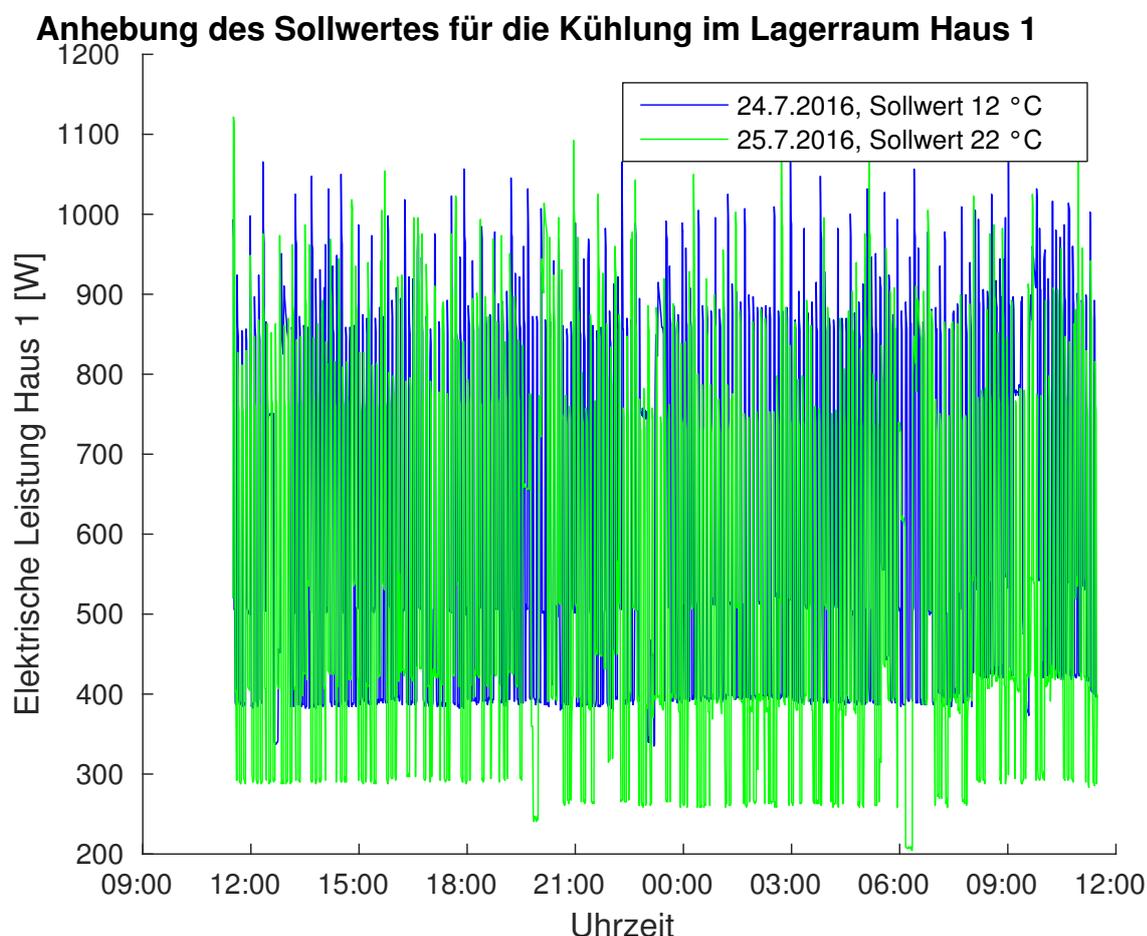


Abbildung 9.7-6: Leistungsaufnahme Haus 1, jeweils 24 Stunden vor (blau) und nach Sollwertänderung (grün) am 24.7.2017. Das die Minima in der Leistungsaufnahme vor der Umstellung um ca. 100 W höher liegen, ist auf die durchgehend laufende Kühlung zurück zu führen.

9.7.2.3 Abschaltung der Spüllüftungen in Musikraum und Pausenhalle

Im Ausgangszustand lief die Spüllüftung von Pausenhalle und Musikraum unter der Woche täglich eine halbe Stunde, Samstags und Sonntags jeweils eine Stunde mit einer Leistung von ca. 6 kW. Der Ausgangszustand ist in Abbildung 9.7-7 in blau dargestellt, in grün ist der Lastverlauf nach abschalten der Spüllüftung am Wochenende dargestellt. Die Spüllüftungen, welche eine Leistungsaufnahme von ca. 6 kW für jeweils eine Stunde verursachen sind deutlich zu erkennen. Der Vergleich der Zeiträume an denen die Spüllüftung am Wochenende stattfindet (Sa. und So, jeweils 6:15 - 7:15 Uhr) mit der Leistungsaufnahme 2016 ohne die Spüllüftungen (grün), so ergibt sich ein Verbrauch von 5,48 kWh pro Spüllüftung.

In Folge des Berichts zum Stromverbrauch wurden die am Wochenende stattfindenden Spüllüftungen, für die es keinen nachvollziehbaren Grund gab, bereits im Jahr 2015 ab-

gestellt. Dadurch fand eine Einsparung von 2 Spüllüftungen/Woche * 5,48 kW h/Spüllüftung * 52 Wochen/Jahr = 570 kW h/Jahr statt. Dabei wird angenommen, dass die Spüllüftung vor Optimierung der GLT Software 52 Wochen im Jahr lief. Sicher ist dies nicht, da der Stromzähler Pausenhalle erst seit Juni 2016 Daten liefert, also nach Optimierung der GLT-Software, und unsere Messungen nicht während Ferienzeiten stattfanden, allerdings lief die Spüllüftung während der Osterfeiertage, was auf einen durchgehenden Betrieb hindeutet. Hinzu kommt ab dem 9.6.2016 eine Einsparung von 4 Spüllüftungen, da in der GLT alle Spüllüftungen außer der am Montag abgestellt wurden. Das ergibt 4 Spüllüftungen/Woche * 5,48 kW h/Spüllüftung * 40 Wochen/Jahr = 877 kW h/Jahr. Da dieser Betrieb ohne Nutzerbeschwerden oder wahrnehmbarer Einschränkung in der Luftqualität von statten ging, wurde im Jahr 2017 schließlich auch die Spüllüftung am Montag abgestellt. Dies sparte weitere 1 Spüllüftung/Woche * 5,48 kW h/Spüllüftung * 40 Wochen/Jahr = 219 kW h/Jahr ein.

Insgesamt ergibt sich daher eine Einsparung in Höhe von 1666 kW h/Jahr, welche etwas geringer als die im Bericht zum Stromverbrauch genannten 1890 kW h ist.

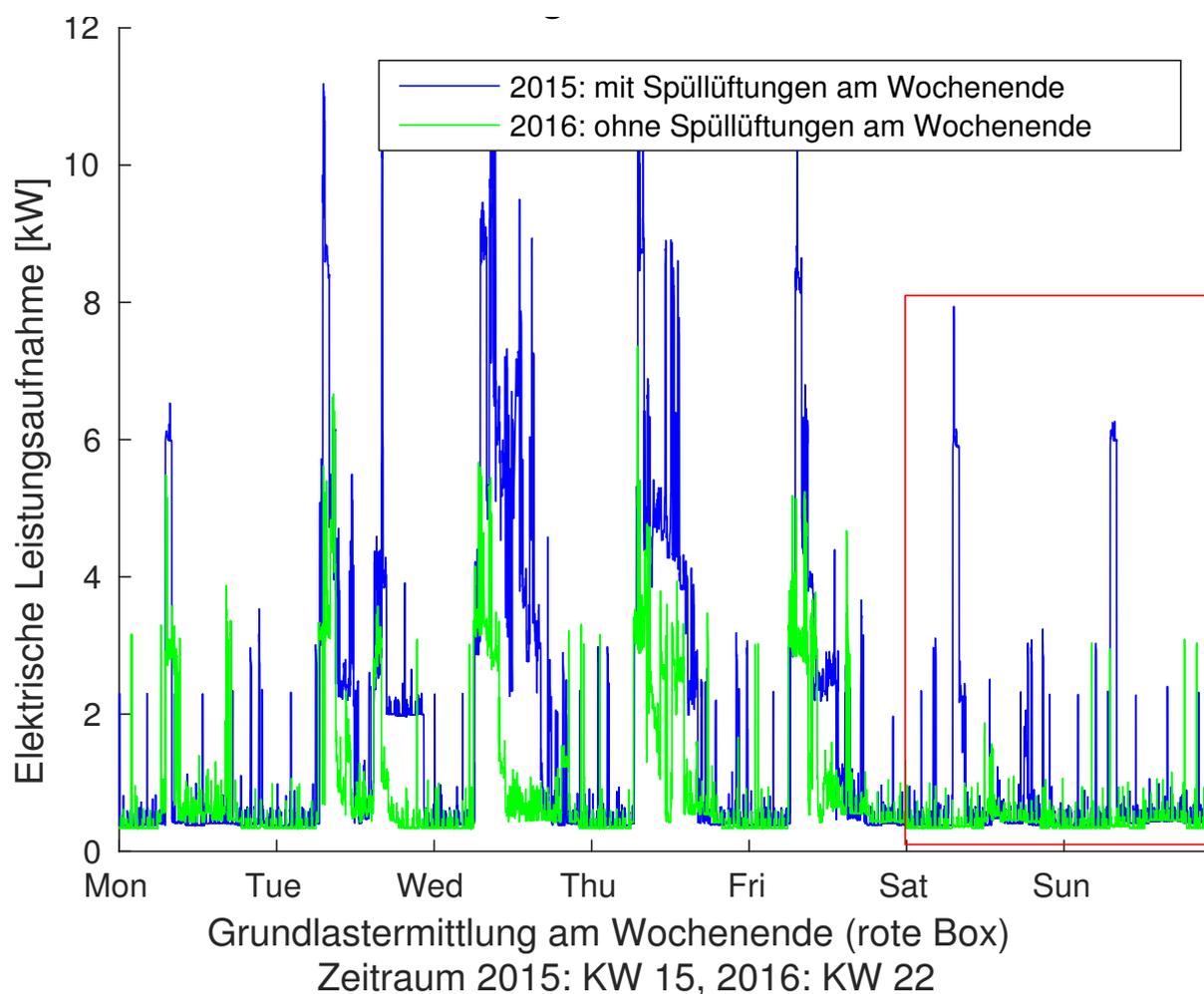


Abbildung 9.7-7: Die Grundlast wurde jeweils an Wochenenden ohne Nutzung ermittelt. Der Zeitraum zur Ermittlung der Grundlast vor Abschaltung der Spüllüftung ist der 11.-12.4.2015, der Verbrauch ergibt sich aus der von uns durchgeführten Leistungsmessung. Die Grundlast nach der Abschaltung der Spüllüftung wurde vom 04.-05.6.2016 unter Verwendung des inzwischen funktionstüchtigen Stromzählers Musikraum/Pausenhalle ermittelt.

Da es keinerlei Nutzerbeschwerden gab, scheint keine Beeinträchtigung des Nutzerkomforts vorzuliegen, daher empfehlen wir die Spüllüftung in Pausenhalle und Musikraum abgeschaltet zu lassen. Es besteht jedoch weiterhin die Möglichkeit die Spüllüftung für ausgewählte Tage über die GLT-Oberfläche wieder in Betrieb zu nehmen.

9.7.2.4 Verkürzung der Spüllüftungen der Klassenhäuser

In der GLT wurde die Möglichkeit geschaffen, die Wochentage und Dauer der Spüllüftung einzustellen. Am 9.6.2016 wurden sie für die Klassenhäuser von 5 x wöchentlich 30 Minuten auf 1 x wöchentlich 30 Minuten umgestellt. Daraus ergibt sich für alle Klassenhäuser zusammen reich rechnerisch eine Stromeinsparung von

$$10,4 \text{ kW} * 4 * 0,5 \text{ Stunden/Woche} * 40 \text{ Schulwochen/Jahr} = 832 \text{ kWh/Jahr.}$$

Die Bilanzierung der tatsächlich Einsparung erfolgte durch den Vergleich von jeweils einer Woche vor- und nach Abschaltung der Spüllüftung, jeweils nur in den Zeiten der Spüllüftung. Die Woche vor der Abschaltung geht vom 30.5.-5.6.2016, die Woche nach Abschaltung der Spüllüftung vom 13.6.-19.6.2016, die Spüllüftungszeiten sind 7:00 - 7:30 Uhr für Haus 1 und 2, 7:30 - 8:00 Uhr für Haus 3 und 4 sowie 5:30 - 6:00 Uhr für Haus 5. Diese Zeiten ergeben sich aus den in der GLT hinterlegten Nutzungszeiten.

Die Überprüfung der Maßnahme durch das Monitoring ergab, dass bei der Programmierung von Haus 2 ein Fehler gemacht wurde, so dass die Spüllüftung nach wie vor täglich lief. Nach einem Hinweis an die Fa. Steiniger am 14.7.2016 wurde dieser Fehler am 15.7.2016 behoben. Die Bilanzierung für Haus 2 nach Abschalten der Spüllüftung wurde daher für die Woche 18.-24.7.2016 durchgeführt.

Die Einsparungen durch die Reduzierung der Spüllüftungen von 5 mal wöchentlich auf einmal wöchentlich ist in Tabelle 9.7-4 dargestellt. Insgesamt ergibt der Vergleich der Messwerte aus den oben genannten Referenzwochen auf ein Jahr mit 40 Schulwochen extrapoliert für alle Klassenhäuser zusammen eine Einsparung in Höhe von 723 kWh. Hervorzuheben ist, dass die Einsparung in Haus 2 aufgrund eines Programmierfehlers nur durch die Kontrolle der Maßnahme im Rahmen des Monitorings realisiert wurde.

Tabelle 9.7-4: Einsparungen durch Reduzierung der Spüllüftungen in den Klassenhäusern.

Gebäude	Einsparung elektrische Energie [kWh/Jahr]
Haus 1	132
Haus 2	137
Haus 3	155
Haus 4	177
Haus 5	146
Summe	723

Da es seit der Neuprogrammierung keine Beschwerden durch die Nutzer bezüglich verschlechterter Luftqualität am Morgen gab, sollte die Reduzierung der Spüllüftungsfrequenz auf einmal wöchentlich beibehalten werden.

9.7.2.5 Anhebung der Heizkurve Lüftung Sporthalle

Die Beheizung der Sporthalle erfolgt über die Lüftung, welche auf eine Heizleistung von 45 kW ausgelegt ist und in der Regel im Umluftbetrieb läuft. Zusätzlich gibt es in den Umkleideräumen eine statische Heizung die auf 12 kW ausgelegt ist. Eine manuelle Analyse des Leistungssignals des Stromzählers der Sporthalle ergab den Verdacht übermäßig langer Laufzeiten des Lüfters. Grund hierfür war eine zu niedrig eingestellte Heizkurve für den Vorlauf des Heizregisters der Lüftung. In der Folge lief die Lüftung bei einer Wärmeanforderung im Umluftbetrieb länger als eigentlich notwendig, da die notwendige Heizleistung mit der eingestellten Heizkurve nicht erreichbar war. Am 9.6.2016 wurde die Heizkurve auf (-11—40, 18—28) (T-Außen—T-VL) erhöht, wodurch sich die Laufzeiten des Lüfters deutlich verringerten. Da die Lüftung der Sporthalle keinen eigenen Stromzähler besitzt und der Stromverbrauch sowohl von Nutzungszeiten, Beleuchtungsdauer und Außentemperatur abhängt ist die Bilanzierung der erzielten Einsparung nicht trivial.

Es stellt sich die Frage, wie die geringere Laufzeit des Lüfters, welche sich in einem geringeren Stromverbrauch niederschlägt, bilanziert werden kann, wenn nur der Verbrauch der gesamten Halle bekannt ist.

Daher wird der Einsatz von kWh elektrischer Energie pro kWh eingebrachter Heizenergie für 2 vergleichbare Perioden in der Heizperiode bestimmt. Dabei sind sowohl Ferienzeiten, als auch Außentemperatur und Tageslichtdauer zu beachten. Die Außentemperatur spielt, aufgrund des Einflusses auf den Wärmebedarf und die Sollvorlauf-temperatur im RLT Heizregister über die Heizkurve, eine Rolle. Die Tageslichtdauer ist ebenfalls von Bedeutung, da die Hallenbeleuchtung ein relevanter Stromverbraucher des Stromzählers Sporthalle ist.

Der Bilanzierungszeitraum vor Änderung der Heizkurve ist der 20.3. - 30.4.2016. Der Bilanzierungszeitraum nach Änderung der Heizkurve ist der 21.3. - 1.5.2017. In beiden Zeiträumen findet 6 Wochen Schulbetrieb, unterbrochen durch die Osterfeiertage, statt. Dass diese Zeiträume so kurz sind ist der Tatsache geschuldet, dass der Stromzähler der Sporthalle erst seit dem 15.3.2016 Daten liefert und nach dem 10.5.2016 aufgrund der Außentemperaturen keine relevanten Heizleistungen mehr zu erbringen waren.

Die Messdaten, auf welche sich die Analyse stützt sind in Abbildung 9.7-8 dargestellt. Auffällig ist die deutlich höhere Heizleistung im Jahr 2017 bei ähnlichem Stromverbrauch.

Die absoluten Zahlen sind der Tabelle 9.7-5 zu entnehmen. Daraus wird ersichtlich, dass bei ähnlichen Außentemperaturbedingungen der pro kWh elektrischer Energie fast doppelt soviel Heizenergie eingebracht wird wie vor der Anhebung der Heizkurve. Dabei sind Beleuchtung und alle anderen Stromverbräuche mit inbegriffen. Bezogen auf den Lüfter, dessen Stromverbrauch jedoch unbekannt ist, würde diese Zahl noch deutlich höher ausfallen. Auch der absolute Stromverbrauch sinkt im Vergleichszeitraum um 180 kWh. Da es sich bei dem Vergleichszeitraum nur um 6 Wochen handelt ist davon auszugehen dass die Einsparung für eine gesamte Heizperiode mindestens das 4-fache, also 720 kWh beträgt.

In Abbildung 9.7-9 ist zu sehen, dass die Halle nach Anhebung der Heizkurve deutlich besser beheizt wird. Dies ist auch der Grund für den gestiegenen Wärmeverbrauch. Allerdings ist auch sichtbar dass die Heizkurve im Bereich von 2-18 °C immer noch zu niedrig ist, da die Solltemperatur noch häufig unterschritten wird.

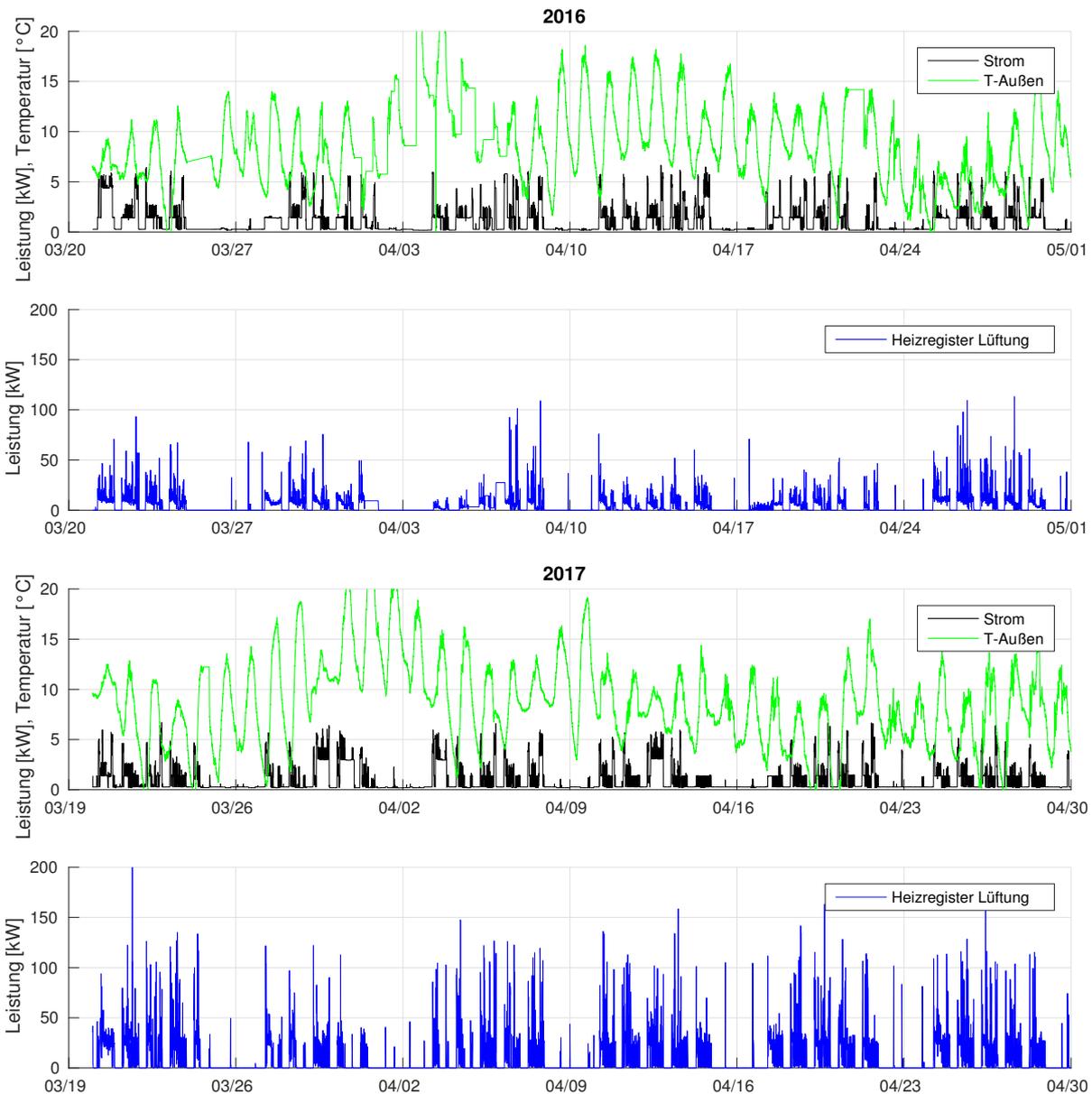


Abbildung 9.7-8: Wärmeleistung der Hallenheizung sowie elektrische Leistung der gesamten Sporthalle. Die Arbeit ist der Tabelle 9.7-5 zu entnehmen.

	Verbrauch 2016	Verbrauch 2017
Verbrauch Heizregister Lüftung [kWh]	4760	7179
Verbrauch Strom Sporthalle [kWh]	1145	965
kWh_{el}/kWh_{therm}	0,24	0,13

Tabelle 9.7-5: Wärmeverbräuche der Hallenheizung und Stromverbrauch der Sporthalle. Vergleichszeitraum 2016: 20.3.-1.5. 2017: 19.3.-30.4.

Um diese Unterschreitungen der Solltemperatur bei Außentemperaturen über 0 °C zu verhindern, empfehlen wir die Heizkurve flacher zu machen und gleichzeitig nach oben zu verschieben. Gleichzeitig wird dies die Laufzeit des Lüfters weiter verringern und den Wärmeverbrauch weiter steigern.

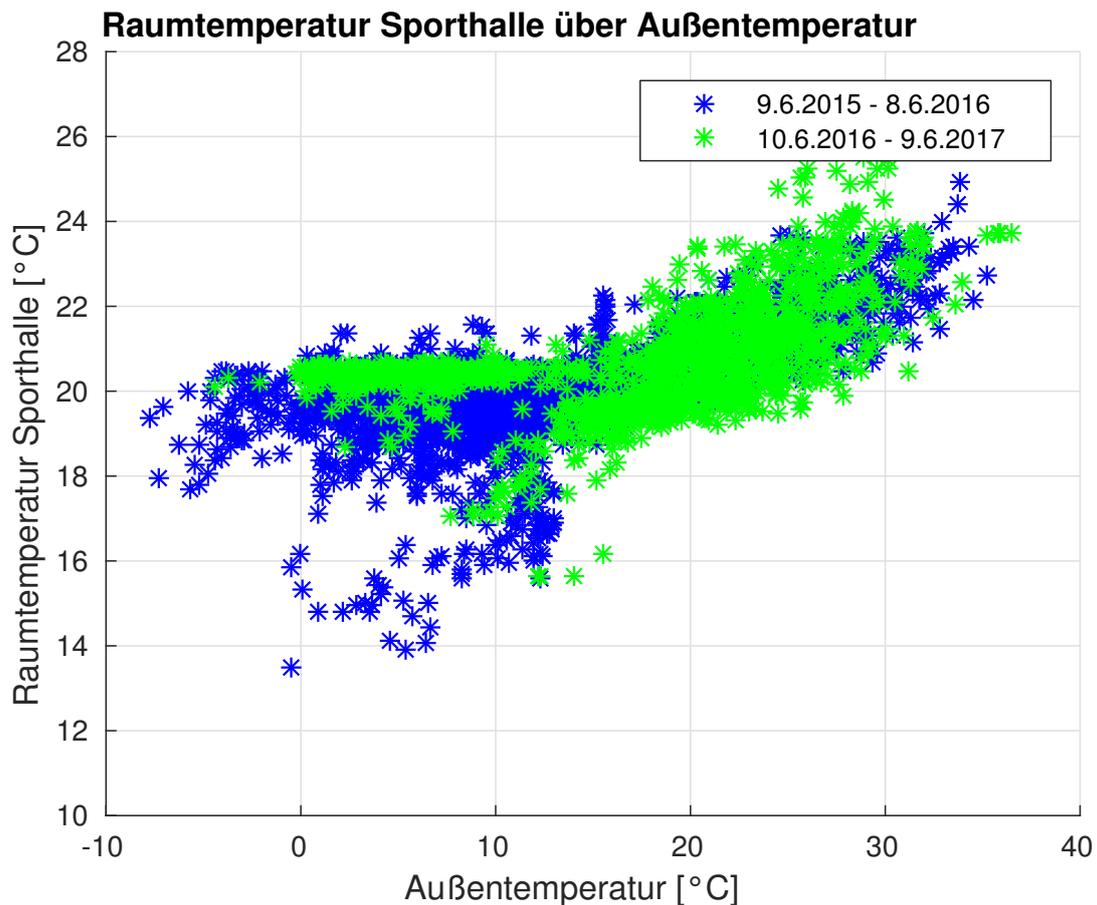


Abbildung 9.7-9: Temperatur in der Sporthalle vor (blau) und nach (grün) Anhebung der Heizkurve. Aufgrund der Platzierung des Temperatursensors liegt die gemessene Raumtemperatur höher als die Temperatur am Hallenboden, wo die Kinder sich aufhalten. Dies ist der Grund für den hohen Sollwert von 20 °C.

9.7.2.6 Reduzierung der Wassermengen in der Fernwärme

Eine Überprüfung der Durchflussmenge in der Einspeisung der Fernwärme ergab, dass der maximale Durchfluss immer genau dann erreicht wird, wenn der Speicher in der Sporthalle geladen wird. Diese Erkenntnis führte zu einer Drosselung der Speicherladung am 27.5.2015 von vorher 42 L min⁻¹ auf 18-24 L min⁻¹. Dadurch sank der Gesamtdurchfluss der Fernwärme in den Folgemonaten dauerhaft auf unter 2 m³/h, was auch zu Beginn der der folgenden Heizperiode so blieb, wie in Abbildung 9.7-10 zu sehen ist. Daher waren keine Einschränkungen im Betrieb zu erwarten. In der Folge wurde die Fernwärmeleistung durch Vattenfall am 15.10.2015 von 3000 L min⁻¹ auf 2000 L min⁻¹ gesenkt. Dies führte zunächst zu den in Abbildung 9.7-11 gezeigten Problemen eines erhöhten Differenzdrucks, welcher nach einem weiteren Eingriff am 2.11.2015 zur Senkung jedoch noch weiter anstieg. Erst ein dritter Eingriff durch Techniker von Vattenfall konnte den Differenzdruck wieder in Nähe des Ausgangszustands versetzen.

Nachdem die Wassermenge gesenkt und er Differenzdruck erfolgreich wiederhergestellt war, entstand am 4.1.2016 bei Außentemperaturen von ca. -7 °C eine Unterversorgungssituation, welche in Abbildungen 9.7-12 und 9.7-15 (a) an dem durchgängigen Verbrauch von 2 m³/h zu erkennen ist. Eine Analyse der Unterversorgung ergab, dass

die Leistung der Fernwärme zu niedrig war weil die Vorlauftemperatur um bis zu 20 K unterhalb der von Vattenfall an ihrer eigenen Einspeisepunkt garantierten Temperatur lag. Das Problem der niedrigen Vorlauftemperatur zeigt die Analyse der Vorlauftemperaturen am Übergabepunkt in der Schule Sterntalerstraße welche in Abbildung 9.7-13 für die drei Winter 2013/14, 2014/15 und 2015/16 gezeigt ist.

Nachdem der Schulbau dieses Problem meldete führte die Firma Vattenfall vom 8.-22.02.2016 eine eigene Messung der Vorlauftemperaturen durch und erhöhte in der Folge, aufgrund der zu niedrigen Vorlauftemperaturen, die Wassermenge als Freileistung um $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Durch diese Maßnahme konnte die vom Schulbau Hamburg bezahlte Wassermenge in der Fernwärmeversorgung der Schule Sterntalerstraße um ein Drittel von 3000 L h^{-1} auf 2000 L h^{-1} gesenkt werden, was einer jährlichen Einsparung von ca. 6.000 € entspricht.

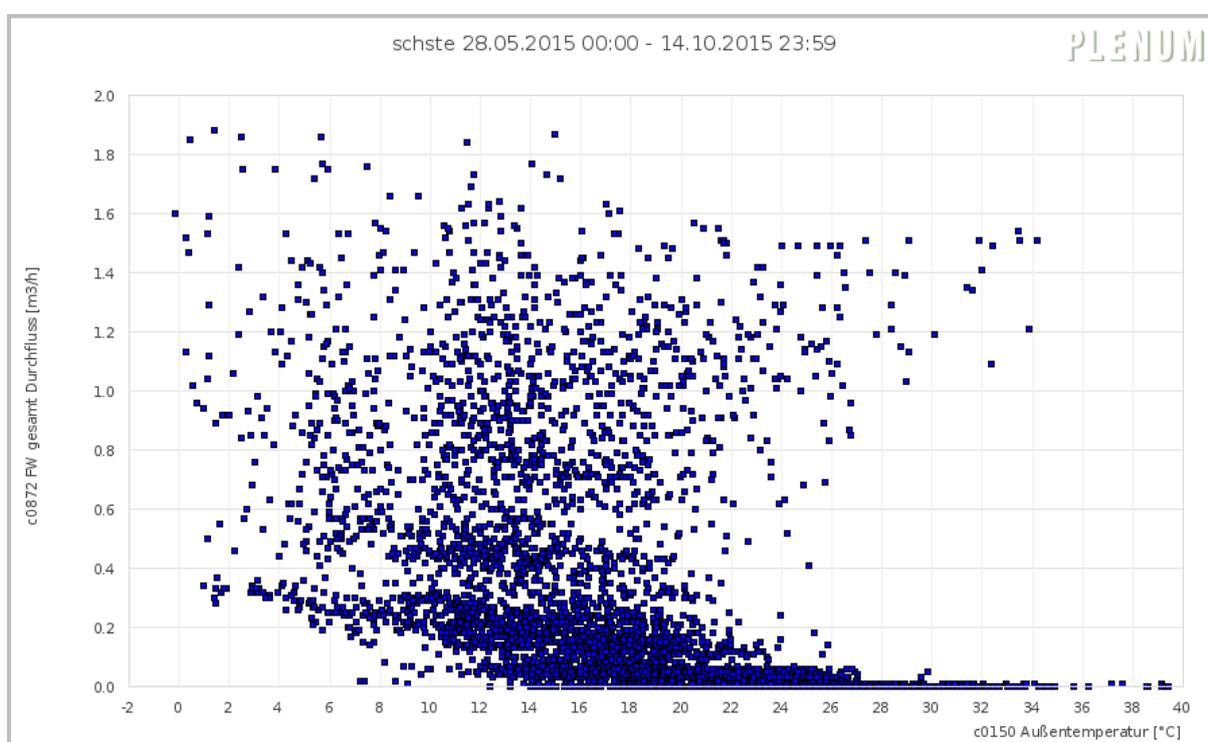


Abbildung 9.7-10: Der Durchfluss der Fernwärmeeinspeisung blieb vom Zeitpunkt der Drosselung des Speichers (27.5.2015) bis zur Drosselung des Anschlusses durch Vattenfall (15.10.2015) ständig unter $2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Dass Monitoring konnte in diesem Fall sowohl die maximal mögliche Einsparung aufzeigen, als auch Probleme in der Umsetzung zuordnen. Die Behebung der Umsetzungsprobleme wurde ebenfalls dokumentiert.

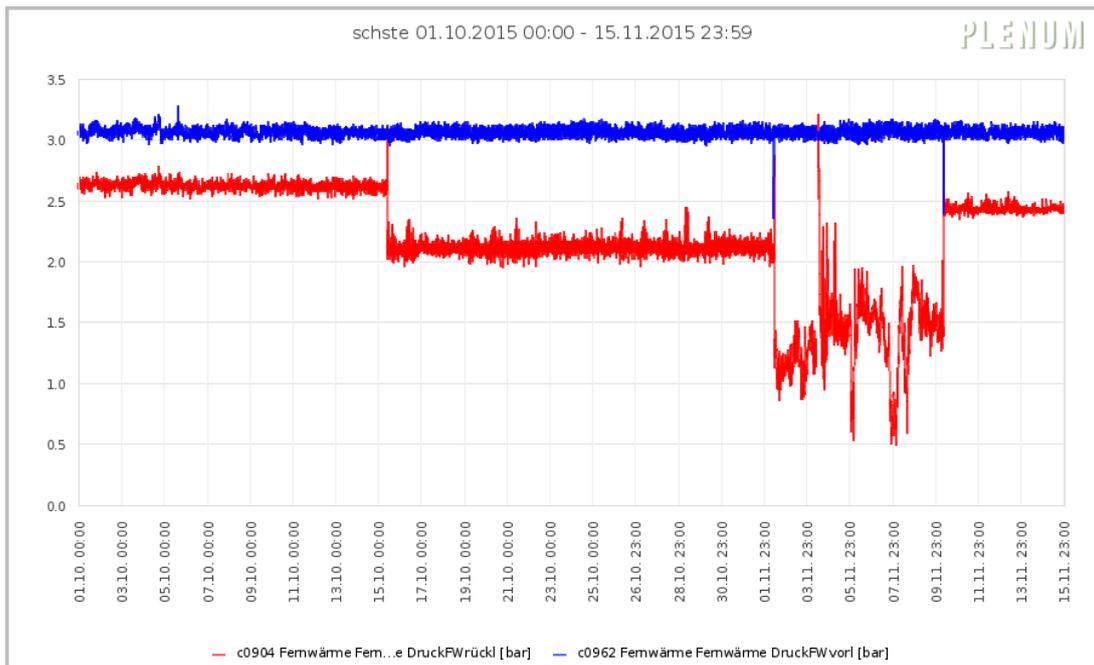


Abbildung 9.7-11: Änderung des Differenzdrucks der Fernwärmeeinspeisung nach Eingriffen durch Techniker von Vattenfall.

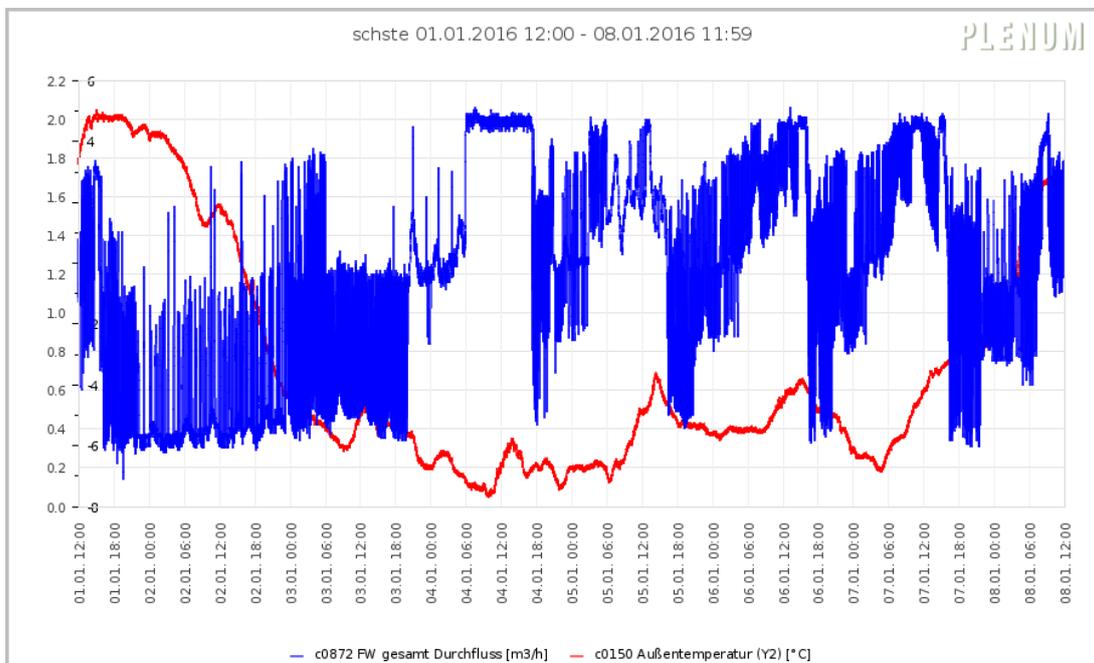


Abbildung 9.7-12: Durchfluss Fernwärmeeinspeisung. Der durchgängige Verbrauch von 2 m³/h am 4.1.2016 weist auf eine Unterversorgung hin.

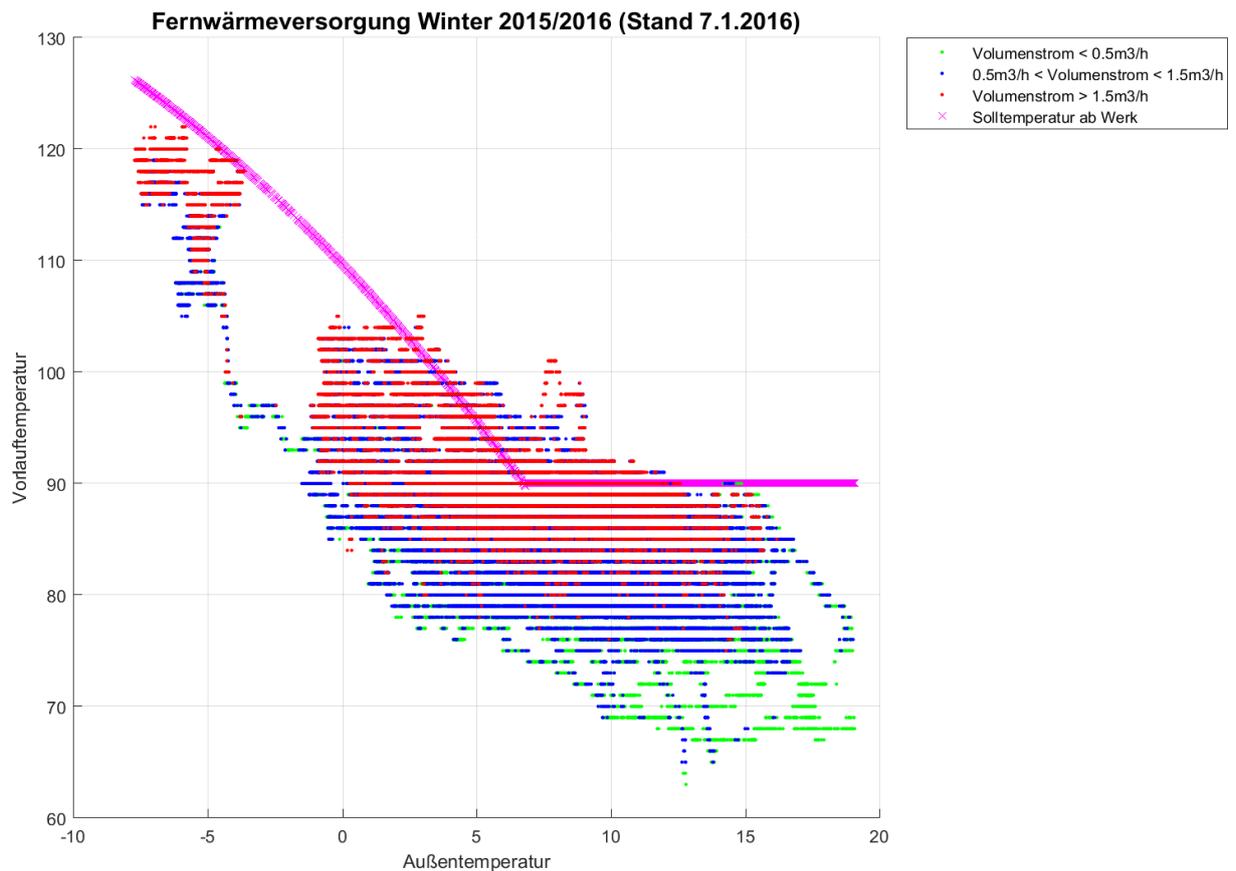


Abbildung 9.7-13: Die tatsächlichen Vorlauftemperaturen (Rot, Grün, Blau) liegen häufig um bis zu 20 K unter der von Vattenfall am Einspeisepunkt garantierten Temperatur (Magenta)

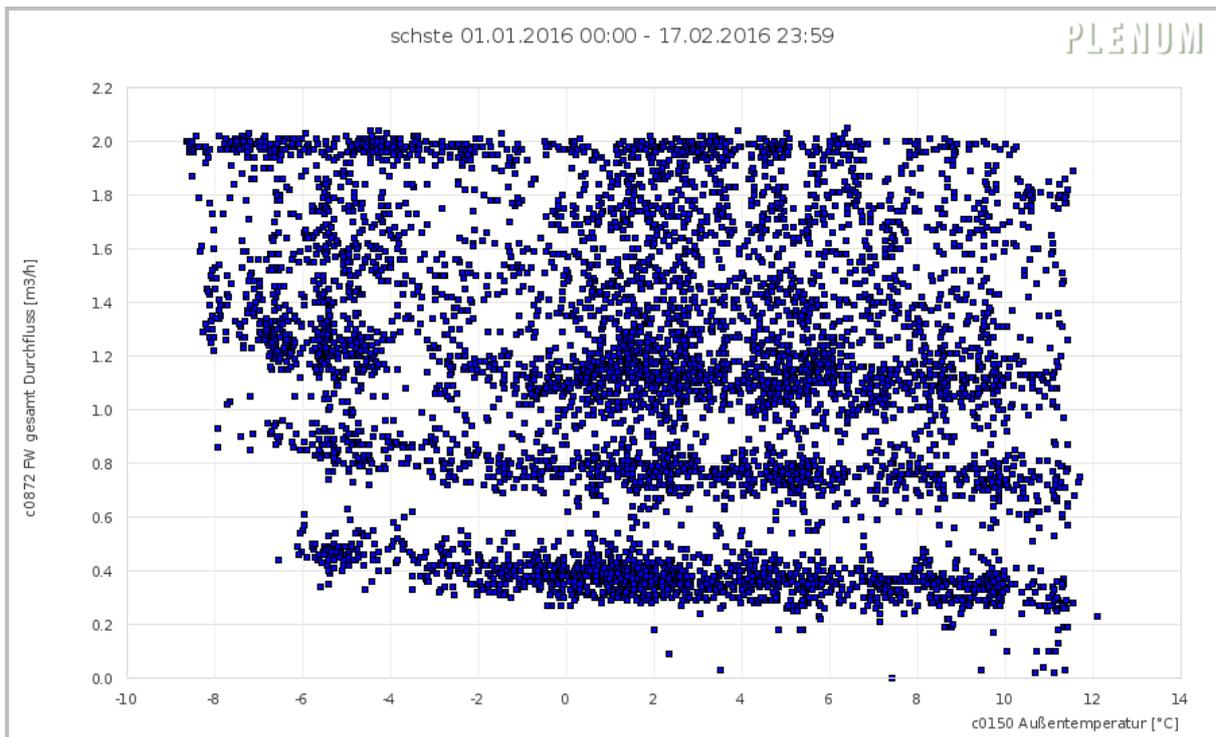


Abbildung 9.7-14: Durchfluss Fernwärme über Außentemperatur. Der Durchfluss ist auf $2\text{ m}^3/\text{h}$ begrenzt. Die Unterversorgung wird an dem häufig beim Maximum von $2\text{ m}^3/\text{h}$ liegenden Durchfluss sichtbar.

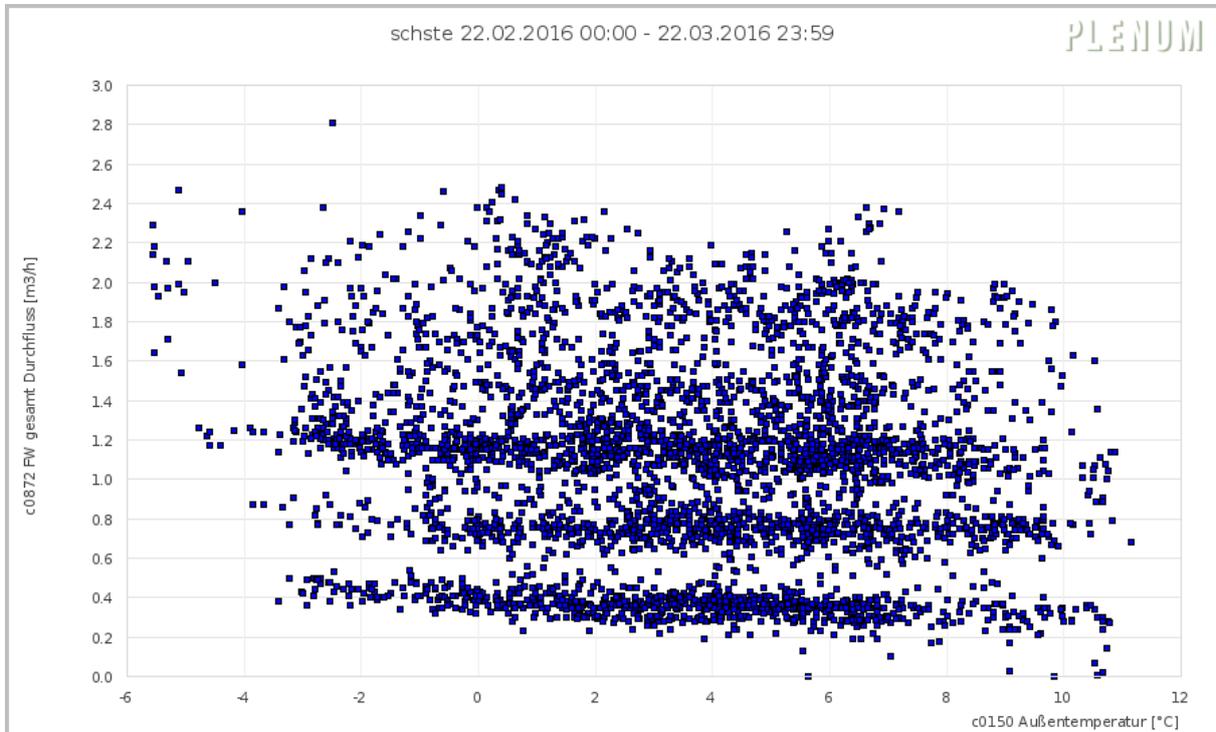


Abbildung 9.7-15: Durchfluss Fernwärme über Außentemperatur. Der Durchfluss ist auf $2,3\text{ m}^3/\text{h}$ begrenzt, davon sind $0,3\text{ m}^3/\text{h}$ Freileistung des Versorgers aufgrund der niedrigen Vorlauftemperatur. Die Unterversorgung ist somit behoben.

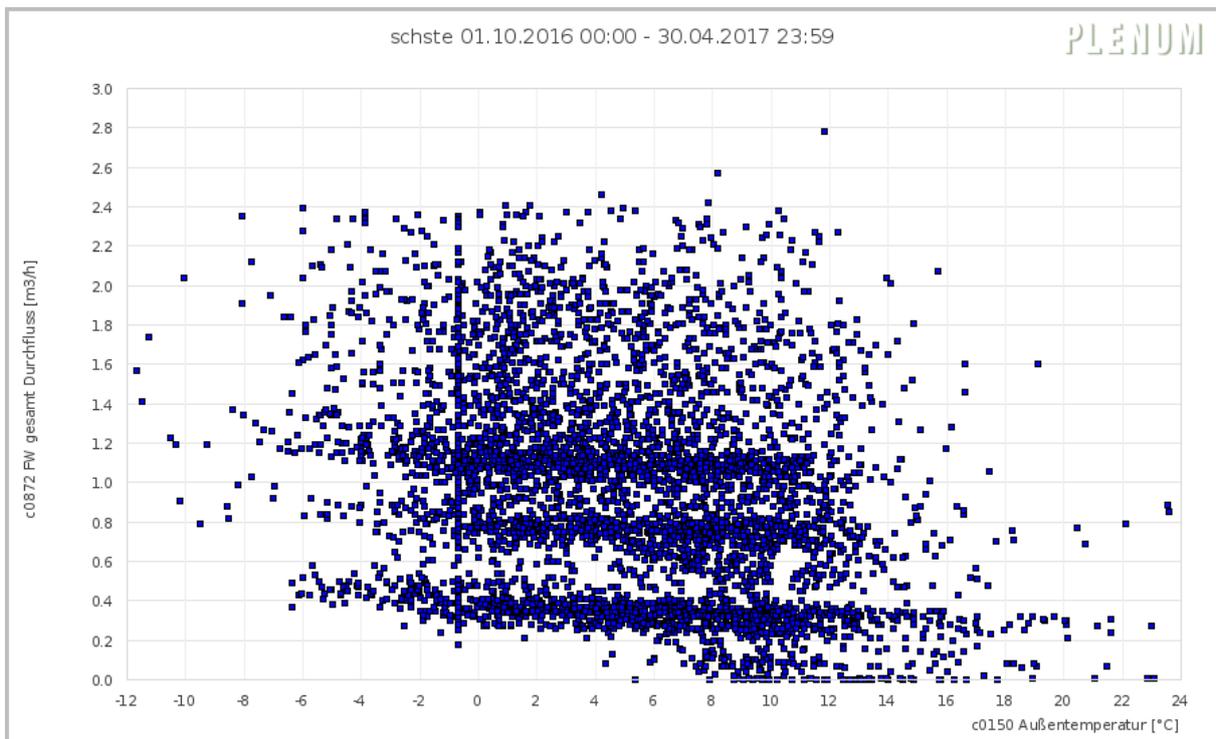


Abbildung 9.7-16: Im Winter 2016/2017 ist keine Unterversorgung zu erkennen. Die Freileistung von Vattenfall scheint eher $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ zu betragen, so dass die maximale Wassermenge $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ ist.

9.7.2.7 Anpassung der CO_2 Grenzen in den Klassenhäusern

Im Zuge der Erweiterung der GLT wurden im März 2016 die Schaltschwellen, ab denen die Lüftung wegen zu hoher CO_2 Konzentration einspringt, von einem festen Wert auf einen Offset, bezogen auf die Außenluftkonzentration, umgestellt. Dies ermöglicht ein gleichbleibendes Lüftungsverhalten über das Jahr bei wechselnden Außenluftkonzentrationen. Im Zuge der Optimierung der GLT Parametrierung am 9.6.2016 wurde als Schaltschwelle eine CO_2 Konzentration von 300 ppm über der Außenluft sowie eine Hysterese von 100 ppm festgelegt. Dies verhindert unnötig lange Laufzeiten der Lüftung bei hohen Außenkonzentrationen und spart damit elektrische Energie. Die Höhe der Einsparung lässt sich aufgrund der vielen variablen Parameter leider nicht ermitteln, es wurde jedoch überprüft dass in den Klassenräumen keine problematische Verschlechterung der Luftqualität durch diese Maßnahme auftritt.

9.7.3 Bilanzierung

Der Energieverbrauch von Schulen wird in Hamburg schon seit 1994 im Rahmen eines fifty/fifty-Projektes erfasst. Auf diese Informationen kann ergänzend zurückgegriffen werden um die Auswirkung von Maßnahmen zu beurteilen. Die in diesem Rahmen erfassten Wärmeverbräuche sind witterungskorrigiert. Im Rahmen des Monitorings werden Daten seit Ende 2011 erfasst. Diese wurden auch schon im Forschungsprojekt ModQS ausgewertet.

9.7.3.1 Verbrauchsentwicklung nach 1. Sanierung

Als Folge der ersten Sanierung von 2003/2004 wurde der Normwärmeverbrauch von 1.130 MWh/Jahr 910 MWh/Jahr gesenkt. Die rechnerische Einsparung von 220 MWh/Jahr entspricht auch etwa der tatsächlichen Einsparung.

Abgeschätzt entsprechen 220 MWh in den sanierten Gebäuden einer Einsparung von ca. 60 %. Es verbleibt ein restlicher Verbrauch von rund 145 MWh/Jahr für die Verwaltung und einen Teilbereich der Sporthalle.

Der neue Normbedarf von 910 MWh/Jahr wird in den Jahren 2006-2009 ziemlich genau eingehalten und kann deshalb als Bezugsgröße dienen.

9.7.4 Entwicklung des Energieverbrauchs

Die Entwicklung des Fernwärme- und Stromverbrauchs zwischen 2007 und 2016 zeigt die Tabelle 9.7-6.

Tabelle 9.7-6: Entwicklung der Energieverbräuche in der Schule Sterntalerstraße

Jahr	Fernwärme MWh	Normverbrauch MWh	Elektro kWh
2007	952	976	32.782

Jahr	Fernwärme	Normverbrauch	Elektro
	MWh	MWh	kWh
2008	993	976	35.998
2009	948	976	36.669
2010	885	976	37.340
2011	743	826	37.603
2012	511	545	39.999
2013	425	466	97.582
2014	416	475	84.072
2015	429	475	71.802
2016	387	475	62.964

Bezogen auf die zusätzliche sanierten Gebäude entspricht dies einer Senkung des Wärmeverbrauchs von rund 68 %. Auffällig ist der starke Anstieg des Stromverbrauchs im Zuge der Sanierung. Hierfür sind vielfältige Gründe gegeben. Sie werden nachfolgend auch noch dargestellt. Als Folge des Monitorings und daraus abgeleiteter Maßnahmen konnte der Stromverbrauch zwischen 2013 und 2016 um immerhin 35,5 % gesenkt werden. Eine Bilanzierung der Verhältnisse zu Beginn des Monitorings zeigt die Tabelle 9.7-7.

Tabelle 9.7-7: Bilanzierung 2013

1. Verbrauch vor 1. Sanierung	1.130	MWh/a
2. Verbrauch vor Grundinstandsetzung	910	MWh/a
3. Verbrauch Verwaltung + Anteil Sporthalle geschätzte Einsparung 60 % (1.-2.)*2/3	145	MWh/a
4. Anteil Verbrauch Verwaltung vor Umbau, geschätzt + Hausmeister	95	MWh/a
5. Verbrauch Klassenhäuser, Sporthalle, Pausenhalle vor der Sanierung (2.-4.)	830	MWh/a
6. Verbrauch 2013, witterungskorrigiert	425	MWh/a
7. Verbrauch Hausmeister	28	MWh/a
8. Verbrauch Klassenhäuser, Sporthalle, Pausenhalle nach Sanierung (bezogen auf 2013 (6.-4.))	345	MWh/a
9. Senkung Schule gesamt $((1.-6.)/(1.-7.))*100$	63,2	%
10. Nettogeschossfläche	4.616	m ²
11. Spezifischer Verbrauch der gesamten Schule(6./9.)	88	kWh/m ² a (netto)
12. Spezifischer Verbrauch Klassenhäuser aus Monitoring 2013	68	kWh/m ² a (netto)
13. Spezifischer Verbrauch der gesamten Schule(6./9.)	69	kWh/m ² a (brutto)
14. Spezifischer Verbrauch Klassenhäuser aus Monitoring 2013	51	kWh/m ² a (brutto)

Im Verlauf des begleitenden Monitorings konnte der Fernwärmeverbrauch für die gesamte Schule im Mittel der Jahre 2014-2016 auf 350 MWh/a gesenkt werden. Dies entspricht einer Senkung des spezifischen Verbrauchs von 88 auf 76 kWh/m²a bzw. einer weiteren Senkung um knapp 14 %. Bezogen auf den Verbrauch der Klassenhäuser,

Sporthalle und Pausenhalle ist der durchschnittliche Verbrauch auf 270 MWh/a gesunken. Dies bedeutet eine weitere Verringerung des Verbrauchs um 75 MWh/a und entspricht einer Senkung um 22 %. Damit ist der spezifische Verbrauch dieser Gebäude- teile auf 53 kWh/m²a (netto) gesunken. Bei der Beurteilung des Wärmeverbrauchs Im Jahre 2013 sind einige zusätzliche Aspekte zu bedenken.

1. Während der Bauphase wurde die Schule eine Ganztagschule.
2. Es wird mittlerweile auch in den Ferien eine Betreuung angeboten.
3. Es wurde eine Kantine mit entsprechend zusätzlichem Verbrauch eingebaut.
4. Die Nutzung der Geothermie war 2013 stark eingeschränkt.

9.7.4.1 Vergleich der Bilanzierung - Zeitraum 8.6.2013 - 7.6.2014

Im Rahmen des Monitorings wurden auch Wärmezähler für die verschiedenen Ver- braucher eingebaut. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurde ein Zeitraum gewählt, bei dem von allen Zählern Daten vorliegen. Die Zählerangaben wurden jeweils witterungskorrigiert.

Tabelle 9.7-8: Verteilungsverluste in der Schule Sterntalerstraße 2013-2014

Haus 1, inkl. WW	38,9	MWh	
Haus 2	30,2	MWh	
Haus 3	32,4	MWh	
Haus 4	35,1	MWh	
Haus 5	35,5	MWh	
Sporthalle incl. WW	60,4	MWh	
Pausenhalle/Musikraum	41,2	MWh	
Verwaltung	66,2	MWh	
Hausmeister	24,0	MWh	
Summe der Einzelzähler	378,5	MWh	
Fernwärmezähler	407,4	MWh	
Verteilungsverluste	28,9	MWh	=8 %

Die Verteilungsverluste für die Leitungen und die Speicher betragen vermutlich eher 10 %. Sie werden teilweise durch die Solaranlage gedeckt.

Ein Vergleich der spezifischen Verbräuche zeigt, dass die Verbräuche der einzelnen Gebäude deutlich voneinander abweichen. Während die Klassenhäuser 2-5 einen durch- schnittlichen Verbrauch von 68,3 kWh/m² aufweisen, beträgt er beim Klassenhaus 1 mit der Kantine 109,7 kWh/m². Die Sporthalle erreicht, einschließlich der Warmwasserbe- reitung, einen spezifischen Verbrauch von 96,8 kWh/m²a. Ein Vergleich mit der Auswer- tung von 21 Hamburger Einfeldturnhallen für das Jahr 2000 zeigt, dass die Sporthalle aktuell niedrigere witterungsbereinigte Verbräuche zeigt als alle untersuchten Turn- hallen, die auch sanierte Hallen mit Isolierverglasung und sonstigen Wärmeschutz- maßnahmen enthielten. Der damalige mittlere Verbrauch von 196 kWh/m²a wurde im Betrachtungszeitraum um 51 % unterschritten.

Die früher sanierte Verwaltung weist mit 125,6 kWh/m²a einen fast doppelt so hohen Energieverbrauch auf wie die Klassenhäuser. Als besonders hoch erweist sich der spezifische Verbrauch der Hausmeisterwohnung. Selbst wenn die Kellerräume als vollständig beheizt angesehen werden, ergibt sich noch ein spezifischer Verbrauch von 175,6 kWh/m²a. Würden die Kellerflächen nicht berücksichtigt, läge der spezifische Verbrauch doppelt so hoch.

9.7.5 Empfehlungen

Dem Schulbau Hamburg erscheint der Aufwand, insbesondere für die mechanische Belüftung der Klassenhäuser, zu hoch zu sein, selbst wenn die erzielten Einsparungen als erheblich angesehen werden. Darüber hinaus steht die Frage im Raum, auf welche Messtechnik und Datenerfassung verzichtet werden kann, um den Überwachungsaufwand und seine Kosten zu verringern.

9.7.5.1 Prüfung der Notwendigkeit einer mechanischen Lüftung

An ein oder zwei Klassenhäusern könnte die mechanische Lüftung außer Betrieb genommen werden. Im Zuge eines Monitorings könnte dann geprüft werden, mit welchem Anstieg der CO₂-Konzentration zu rechnen ist und wie sich eine Lüftung auf die CO₂-Konzentration auswirkt. Da der Messbereich der fest installierten CO₂-Sensoren nur bis zu einer Konzentration von 2000 ppm reicht, sollten die Messungen durch eine mobile Messung ergänzt werden, bei der Konzentrationen bis 7000 ppm nachgewiesen werden können.

Weiterhin sollte auch untersucht werden, in welchem Umfang der Wärmeverbrauch ansteigt und ob die statische Heizung in der Lage ist den erforderlichen Heizaufwand sicherzustellen.

9.7.5.2 Verriegelung der Lüftung

Um Energie zu sparen, wird die Lüftung der Klassenräume nur freigegeben, wenn die Anforderung sowohl über Präsenzmelder und CO₂-Konzentration während der festgelegten Nutzungszeiten und nicht geöffneten Fenstern erfolgt. So konnte beispielsweise bei Elternabenden nicht gelüftet werden, obwohl die CO₂-Konzentration dies erfordert hätte. Auf die Verriegelung mit den Nutzungszeiten kann problemlos verzichtet werden.

9.7.5.3 Regelung der Vorlauftemperatur Heizkreis Klassenhäuser

Um die Schwankungen der Vorlauftemperatur bei niedrigen Durchflüssen zu vermeiden, ist die Ventilregelung zu ändern. Die Geschwindigkeit ist zu erhöhen. Eine geeignete Uhrzeit vorausgesetzt, kann die Auswirkung direkt überprüft werden.

9.7.5.4 Anpassung Heizkurven

Sowohl für die Heizkreise Sporthalle und Klassenhäuser sind die Heizkurven anzupassen. Im Fall des Heizkreises Sporthalle ist der Fußpunkt um ca. 8 K anzuheben und die Steigung zu verringern. Bei dem Heizkreis Klassenhäuser sollte wegen der nicht ausreichenden Versorgung des Hauses 5 die Vorlauftemperatur angehoben werden. Für den Fall einer Außerbetriebnahme der mechanischen Belüftung einzelner Klassenhäuser ist in jedem Fall die Vorlauftemperatur anzuheben, da dann die gesamte Heizleistung über die statischen Heizflächen erbracht werden muss und die Wärmerückgewinnung bei der Belüftung entfällt.

9.7.6 Wärmeerzeugung im Vergleich zum Wärmebezug (IngSoft)

In diesem Abschnitt soll der Wärmebezug der Liegenschaft bzw. der Gebäudeteile der Liegenschaft sowie die Wärmeerzeugung aus Geothermie betrachtet werden. Dabei ist zu beachten, dass alle Abbildungen sich auf die Monate von September 2016 bis August 2017 sowie den Vorjahreszeitraum beziehen.

9.7.6.1 Gesamte Liegenschaft

Der witterungsbereinigte Wärmebedarf ist im Betrachtungszeitraum September bis August um ca. 90 kWh im Vergleich zum Vorjahreszeitraum gesunken. Jedoch ist der Wärmebedarf in den warmen Monaten Mai bis August 2017 durchgehend höher als im Vorjahreszeitraum. Insgesamt lag der Wärmebedarf in diesem Zeitraum ca. 14146 kWh höher als im Sommer 2016. Gemessen am Wärmebedarf blieb der relative Anteil der Erzeugung im Betrachtungszeitraum mit ca. 7 % im Vergleich zum Vorjahreszeitraum konstant. Auffällig ist, dass der relative Anteil der Erzeugung in den Sommermonaten (Mai bis Juli) besonders hoch ist. Dies kann auch mit dem niedrigen Gesamtbedarf erklärt werden. In den Monaten September 2016 bis Februar 2017 bleibt der Anteil der Erzeugung weitestgehend hinter den Vorjahreswerten zurück, wobei sich in den übrigen Monaten März bis August dieses Bild umgekehrt.

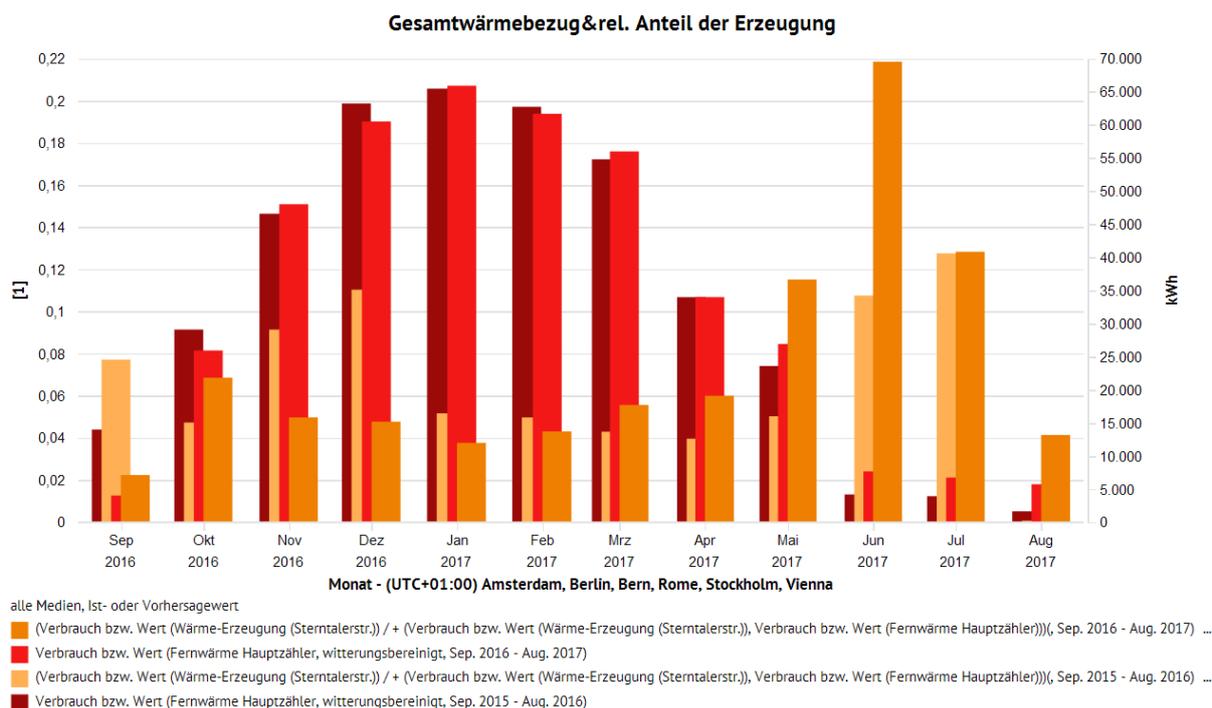


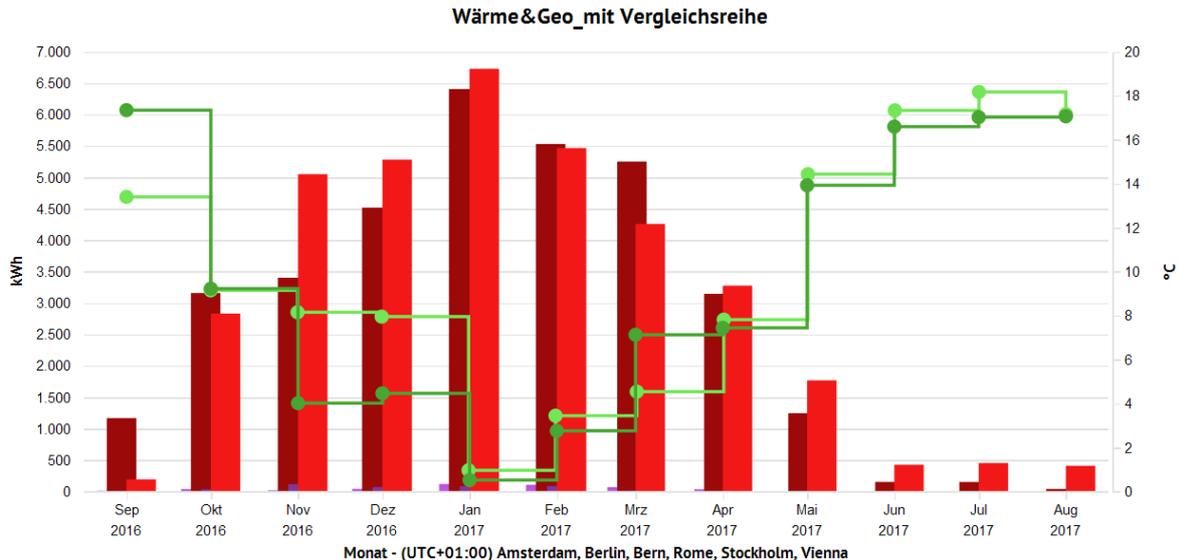
Abbildung 9.7-17: Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, gesamte Liegenschaft

Tabelle 9.7-9: Wärmeverbrauch gesamte Liegenschaft

Monat	Verbrauch bzw. Wert (Fernwärme Hauptzähler) [kWh]	Relativer Anteil [1]	Monat	Verbrauch bzw. Wert (Fernwärme Hauptzähler) [kWh]	Relativer Anteil [1]
Sep 2016	4.039,94	0,02	Sep 2015	13.990,02	0,08
Okt 2016	25.930,01	0,07	Okt 2015	29.086,22	0,05
Nov 2016	47.999,98	0,05	Nov 2015	46.567,97	0,09
Dez 2016	60.492,79	0,05	Dez 2015	63.198,72	0,11
Jan 2017	65.885,26	0,04	Jan 2016	65.442,18	0,05
Feb 2017	61.652,87	0,04	Feb 2016	62.704,88	0,05
Mrz 2017	55.970,49	0,06	Mrz 2016	54.780,26	0,04
Apr 2017	33.979,46	0,06	Apr 2016	33.975,46	0,04
Mai 2017	26.912,05	0,12	Mai 2016	23.586,82	0,05
Jun 2017	7.672,99	0,22	Jun 2016	4.198,02	0,11
Jul 2017	6.751,01	0,13	Jul 2016	3.940,10	0,13
Aug 2017	5.743,47	0,04	Aug 2016	1.657,98	0,00
Summe	403.030,33	0,89		403.128,61	0,80
Maximalwert	65.885,26	0,22		65.442,18	0,13
Minimalwert	4.039,94	0,02		1.657,98	0,00
Durchschnittswert	33.585,86	0,07		33.594,05	0,07

9.7.6.2 Haus 1

In diesem Gebäudeteil ist der Anteil der Erzeugung im Vergleich zu allen anderen Gebäudeteilen am niedrigsten. Verglichen mit der Gesamtbetrachtung fällt auf, dass hier nicht in den Monaten Mai bis Juli die meiste Wärme gewonnen werden konnte, sondern dass nur in den Monaten November bis Februar signifikante Energiemengen generiert werden konnten. Im Betrachtungszeitraum blieb die insgesamt erzeugte Wärme mit ca. 15 kWh hinter dem Vorjahreszeitraum zurück. Der witterungsbereinigte Gesamtbedarf war mit einer Differenz von ca. 400 kWh im Vergleich zum Vorjahreszeitraum ebenfalls leicht rückläufig.



Haus 1
 ■ Verbrauch bzw. Wert (alle Medien, Wärme (Gt), Ist- oder Vorhersagewert, , Sep. 2016 - Aug. 2017)
 ■ Verbrauch, aufgeteilt (kWh, alle Medien, Wärme-Erzeugung, ein Energiebereich, Ist- oder Vorhersagewert, , Sep. 2016 - Aug. 2017)
 ■ Klimadaten (Außentemperatur, Sep. 2016 - Aug. 2017, Aktuelle Werte) ■ Verbrauch bzw. Wert (alle Medien, Wärme (Gt), Ist- oder Vorhersagewert, , Sep. 2015 - Aug. 2016)
 ■ Verbrauch, aufgeteilt (kWh, alle Medien, Wärme-Erzeugung, ein Energiebereich, Ist- oder Vorhersagewert, , Sep. 2015 - Aug. 2016)
 ■ Klimadaten (Außentemperatur, Sep. 2015 - Aug. 2016, Aktuelle Werte)

Abbildung 9.7-18: Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 1

Tabelle 9.7-10: Wärmeverbrauch Haus 1

Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungsbereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1) [kWh]	Relativer Anteil [1]	Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungsbereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1)[kWh]	Relativer Anteil [1]
Sep 2016	191,00	2,91	0,01	Sep 2015	1.166,14	10,58	0,01
Okt 2016	2.741,04	34,48	0,01	Okt 2015	3.036,15	37,60	0,01
Nov 2016	4.735,72	114,26	0,02	Nov 2015	4.357,23	17,60	0,01
Dez 2016	6.115,45	69,39	0,01	Dez 2015	6.745,78	40,38	0,01
Jan 2017	6.770,06	82,78	0,01	Jan 2016	6.596,13	117,74	0,02
Feb 2017	6.162,83	84,92	0,02	Feb 2016	6.480,76	105,14	0,02
Mrz 2017	5.569,23	11,76	0,00	Mrz 2016	5.658,27	66,74	0,01
Apr 2017	3.336,42	5,50	0,00	Apr 2016	3.300,86	33,89	0,01
Mai 2017	2.489,82	9,83	0,01	Mai 2016	2.114,28	1,51	0,00
Jun 2017	423,50	0,00	0,00	Jun 2016	150,44	0,00	0,00
Jul 2017	450,85	0,00	0,00	Jul 2016	149,57	0,00	0,00
Aug 2017	406,74	0,00	0,00	Aug 2016	38,83	0,00	0,00
Summe	39.392,66	415,83	0,10		39.794,43	431,17	0,10
Maximalwert	6.770,06	114,26	0,02		6.745,78	117,74	0,02
Minimalwert	191,00	0,00	0,00		38,83	0,00	0,00
Durchschnittswert	3.282,72	34,65	0,01		3.316,20	35,93	0,01

9.7.6.3 Haus 2

In diesem Gebäudeteil deckt sich die Erkenntnis aus der Gesamtliegenschaft, dass in den Monaten Mai bis Juli relativ die meiste Wärme erzeugt werden kann. Absolut ist der witterungsbereinigte Wärmebedarf im Betrachtungszeitraum um ca. 2400 kWh

Tabelle 9.7-11: Wärmeverbrauch Haus 2

Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungs-bereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1) [kWh]	Relativer Anteil [1]	Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungs-bereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1)[kWh]	Relativer Anteil [1]
Sep 2016	139,78	0,00	0,00	Sep 2015	888,57	11,88	0,01
Okt 2016	1.942,56	0,00	0,00	Okt 2015	2.266,76	1,45	0,00
Nov 2016	3.781,12	0,00	0,00	Nov 2015	3.300,77	1,46	0,00
Dez 2016	5.065,18	37,81	0,01	Dez 2015	5.026,51	1,59	0,00
Jan 2017	5.524,54	46,91	0,01	Jan 2016	5.127,64	0,68	0,00
Feb 2017	5.153,89	45,96	0,01	Feb 2016	4.644,22	0,45	0,00
Mrz 2017	4.648,48	113,90	0,03	Mrz 2016	4.409,17	1,63	0,00
Apr 2017	2.669,29	72,17	0,03	Apr 2016	2.527,51	2,40	0,00
Mai 2017	2.178,60	244,75	0,14	Mai 2016	1.735,81	35,61	0,03
Jun 2017	474,37	139,21	0,23	Jun 2016	154,03	69,52	0,31
Jul 2017	541,46	30,89	0,05	Jul 2016	107,90	66,80	0,38
Aug 2017	525,97	23,49	0,04	Aug 2016	52,62	0,94	0,02
Summe	32.645,23	755,09	0,55		30.241,51	194,41	0,76
Maximalwert	5.524,54	244,75	0,23		5.127,64	69,52	0,38
Minimalwert	139,78	0,00	0,00		52,62	0,45	0,00
Durchschnittswert	2.720,44	62,92	0,05		2.520,13	16,20	0,06

verglichen mit dem Vorjahreszeitraum gestiegen. Die erzeugte Wärme stieg allerdings überproportional zum Wärmebedarf an (von 194,41 kWh auf 755,09 kWh), wobei die meiste Wärmemenge in den Monaten März bis Juni 2017 generiert werden konnte.

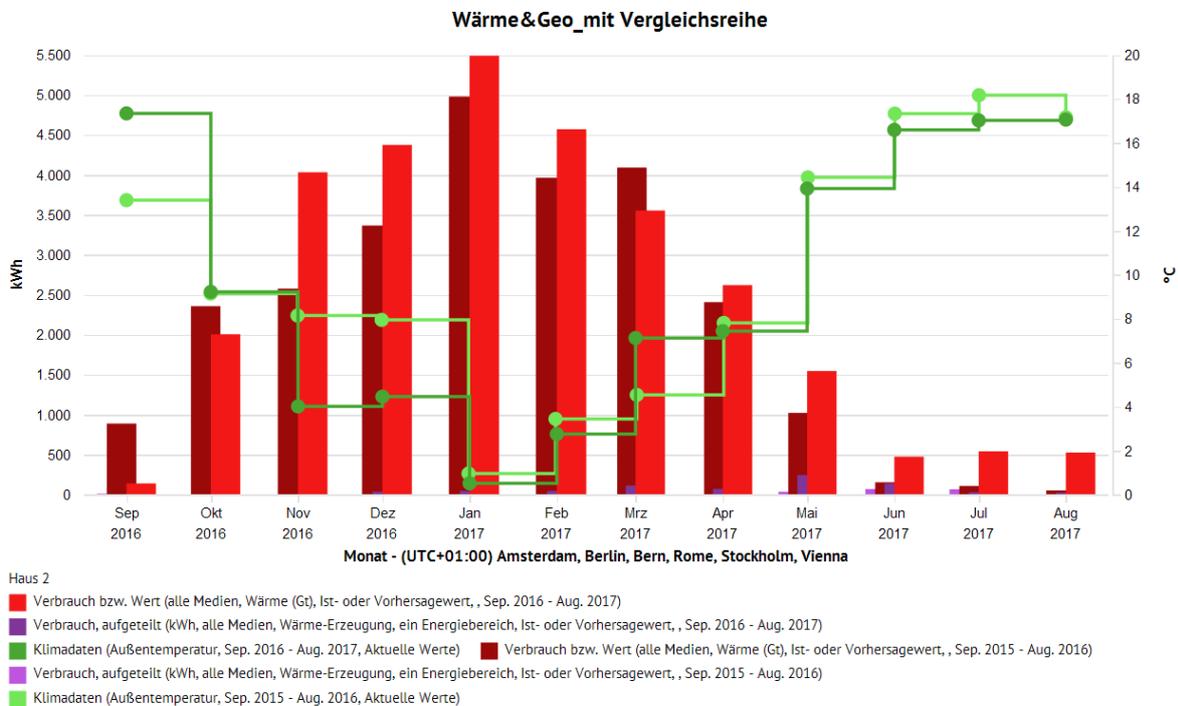


Abbildung 9.7-19: Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 2

9.7.6.4 Haus 3

Hier zeigt sich erneut, dass in den Sommermonaten nahezu keine Wärme gewonnen werden kann, wobei in den Monaten November bis Februar eine größere Ausbeute erzielt werden konnte. Insgesamt war die Wärmegewinnung im Betrachtungszeitraum im Vergleich zum Vorjahreszeitraum um ca. 380 kWh geringer. Gleichzeitig stieg der witterungsbereinigte Gesamtbedarf um ca. 3100 kWh an.

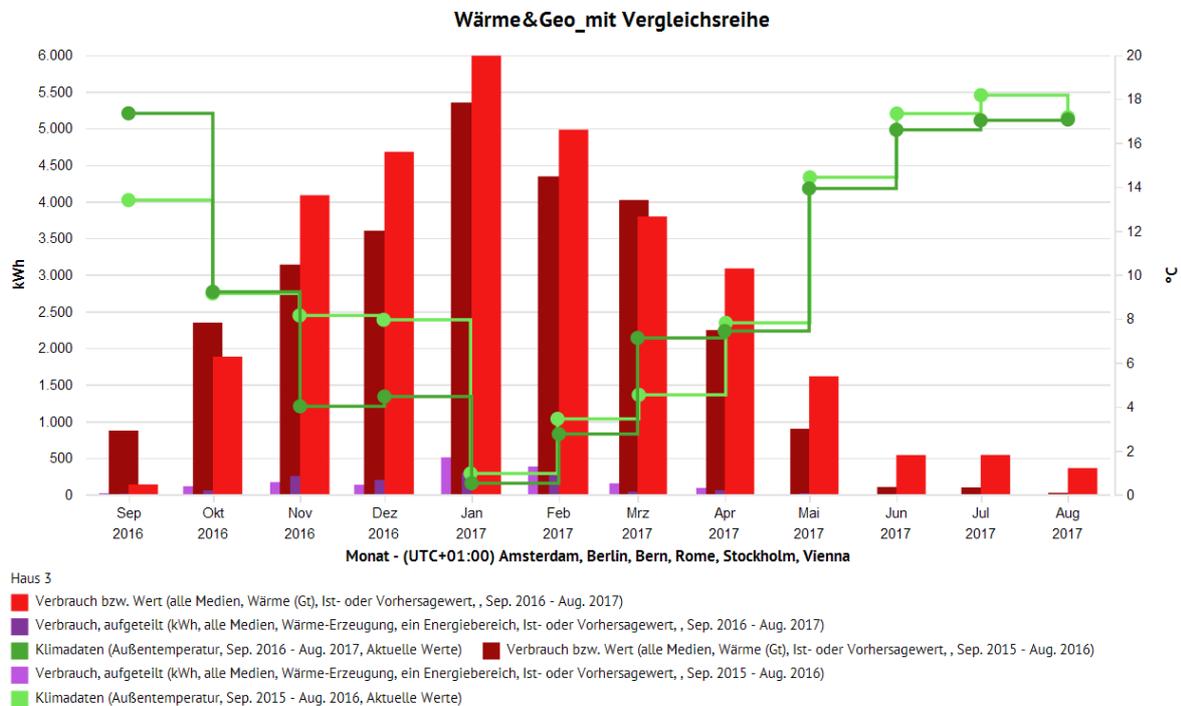


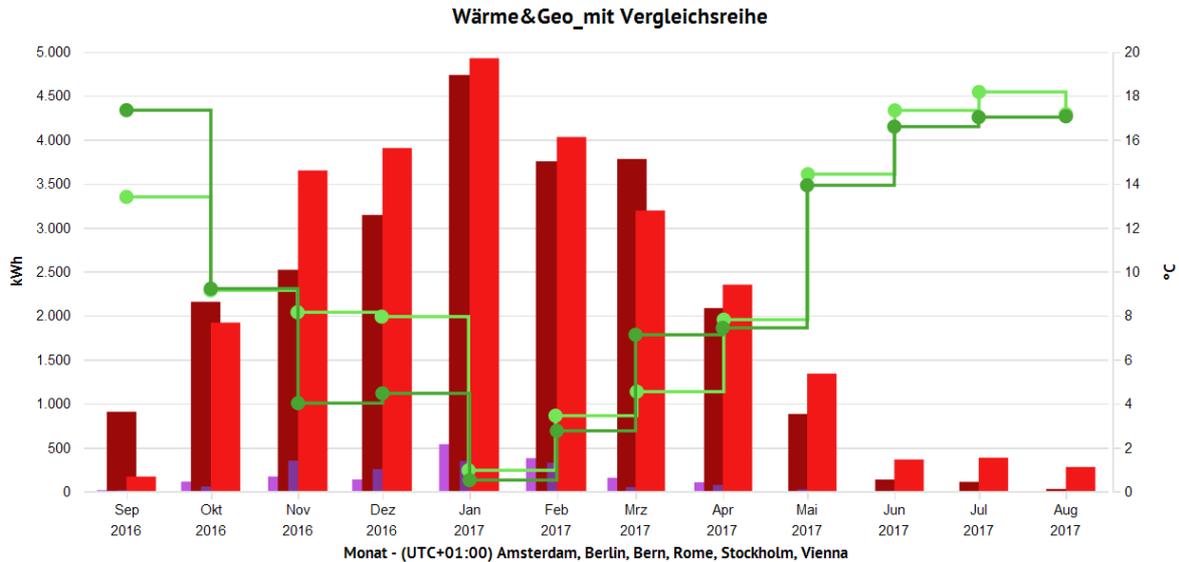
Abbildung 9.7-20: Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 3

Tabelle 9.7-12: Wärmeverbrauch Haus 3

Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungsbereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1) [kWh]	Relativer Anteil [1]	Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungsbereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1)[kWh]	Relativer Anteil [1]
Sep 2016	138,00	10,89	0,07	Sep 2015	871,87	18,98	0,02
Okt 2016	1.822,59	57,59	0,03	Okt 2015	2.255,94	113,13	0,05
Nov 2016	3.830,81	254,34	0,06	Nov 2015	4.019,98	169,10	0,05
Dez 2016	5.416,56	199,91	0,04	Dez 2015	5.377,03	133,73	0,04
Jan 2017	6.026,69	298,71	0,05	Jan 2016	5.509,14	507,45	0,09
Feb 2017	5.614,40	265,16	0,05	Feb 2016	5.087,79	382,11	0,08
Mrz 2017	4.962,91	40,37	0,01	Mrz 2016	4.331,66	153,02	0,04
Apr 2017	3.143,06	59,72	0,02	Apr 2016	2.356,24	90,26	0,04
Mai 2017	2.273,65	18,60	0,01	Mai 2016	1.523,82	5,99	0,01
Jun 2017	539,26	0,00	0,00	Jun 2016	102,83	5,06	0,05
Jul 2017	540,70	0,00	0,00	Jul 2016	97,15	3,17	0,03
Aug 2017	360,93	0,00	0,00	Aug 2016	24,16	0,18	0,01
Summe	34.669,55	1.205,28	0,34		31.557,62	1.582,19	0,49
Maximalwert	6.026,69	298,71	0,07		5.509,14	507,45	0,09
Minimalwert	138,00	0,00	0,00		24,16	0,18	0,01
Durchschnittswert	2.889,13	100,44	0,03		2.629,80	131,85	0,04

9.7.6.5 Haus 4

In diesem Gebäudeteil ist die Wärmegewinnung aus Geothermie in den Monaten Juni bis August in im Betrachtungs- als auch im Vergleichszeitraum nahezu Null. Absolut liegt die Wärmegewinnung aus Geothermie um ca. 100 kWh unterhalb des Vorjahreswertes, relativ zum Bedarf bleibt der Anteil mit 4% unverändert. Die Verteilung der Wärmegewinnung ist analog zu Haus 3 zu betrachten. Der witterungsbereinigte Wärmebedarf nahm im Betrachtungszeitraum um ca. 750 kWh im Vergleich zum Vorjahreszeitraum zu. Dabei ist der Mehrverbrauch hauptsächlich auf die Monate Mai bis August zurückzuführen.



Haus 4
 ■ Verbrauch bzw. Wert (alle Medien, Wärme (Gt), Ist- oder Vorhersagewert, , Sep. 2016 - Aug. 2017)
 ■ Verbrauch, aufgeteilt (kWh, alle Medien, Wärme-Erzeugung, ein Energiebereich, Ist- oder Vorhersagewert, , Sep. 2016 - Aug. 2017)
 ■ Klimadaten (Außentemperatur, Sep. 2016 - Aug. 2017, Aktuelle Werte) ■ Verbrauch bzw. Wert (alle Medien, Wärme (Gt), Ist- oder Vorhersagewert, , Sep. 2015 - Aug. 2016)
 ■ Verbrauch, aufgeteilt (kWh, alle Medien, Wärme-Erzeugung, ein Energiebereich, Ist- oder Vorhersagewert, , Sep. 2015 - Aug. 2016)
 ■ Klimadaten (Außentemperatur, Sep. 2015 - Aug. 2016, Aktuelle Werte)

Abbildung 9.7-21: Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 4

Tabelle 9.7-13: Wärmeverbrauch Haus 4

Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungs-bereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1) [kWh]	Relativer Anteil [1]	Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungs-bereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1)[kWh]	Relativer Anteil [1]
Sep 2016	168,14	12,86	0,07	Sep 2015	905,13	13,69	0,01
Okt 2016	1.858,51	56,38	0,03	Okt 2015	2.072,81	110,54	0,05
Nov 2016	3.422,47	350,34	0,09	Nov 2015	3.228,05	168,85	0,06
Dez 2016	4.521,06	253,40	0,06	Dez 2015	4.694,01	135,75	0,04
Jan 2017	4.956,48	345,59	0,07	Jan 2016	4.876,18	536,41	0,10
Feb 2017	4.544,07	324,38	0,07	Feb 2016	4.397,94	377,60	0,09
Mrz 2017	4.177,67	49,68	0,02	Mrz 2016	4.073,68	154,46	0,04
Apr 2017	2.394,58	73,51	0,03	Apr 2016	2.188,11	103,17	0,05
Mai 2017	1.886,31	23,20	0,02	Mai 2016	1.495,68	2,37	0,00
Jun 2017	362,32	5,83	0,02	Jun 2016	134,29	4,54	0,03
Jul 2017	382,77	1,71	0,00	Jul 2016	107,86	1,61	0,01
Aug 2017	277,13	0,00	0,00	Aug 2016	27,57	0,16	0,01
Summe	28.951,50	1.496,88	0,47		28.201,31	1.609,15	0,50
Maximalwert	4.956,48	350,34	0,09		4.876,18	536,41	0,10
Minimalwert	168,14	0,00	0,00		27,57	0,16	0,00
Durchschnittswert	2.412,63	124,74	0,04		2.350,11	134,10	0,04

9.7.6.6 Haus 5

Der Vorerhitzer, welcher aus der Geothermie Anlage gespeist wird fiel in der Zeit vom 26.10.2015 bis zum 02.06.2017 aus. Vor diesem Hintergrund können die 0 Werte in Grafik und Tabelle bis Mai 2017 erklärt werden. Im August 2017 wurde offensichtlich

keine Wärme aus Geothermie gewonnen. Der witterungsbereinigte Wärmebedarf sank im Betrachtungszeitraum um ca. 1700 kWh, wobei auch hier in den Sommermonaten im Betrachtungszeitraum wesentlich mehr Bedarf anfiel als im Vorjahreszeitraum.

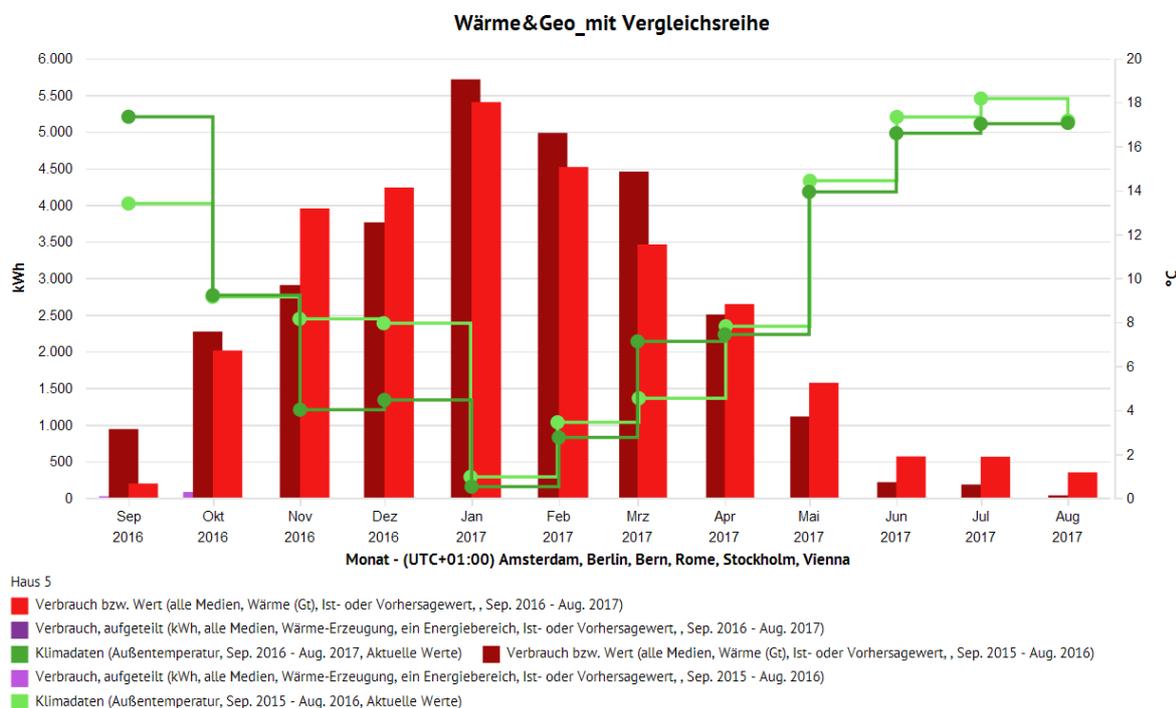


Abbildung 9.7-22: Gesamtwärmebezug und relativer Anteil der Erzeugung, Haus 5

Tabelle 9.7-14: Wärmeverbrauch Haus 5

Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungs-bereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1) [kWh]	Relativer Anteil [1]	Monat	Verbrauch bzw. Wert (Haus 1, witterungs-bereinigt) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Geo Haus 1)[kWh]	Relativer Anteil [1]
Sep 2016	197,21	0,00	0,00	Sep 2015	939,85	23,10	0,02
Okt 2016	1.948,96	0,00	0,00	Okt 2015	2.183,66	81,77	0,03
Nov 2016	3.705,26	0,00	0,00	Nov 2015	3.722,31	0,00	0,00
Dez 2016	4.906,03	0,00	0,00	Dez 2015	5.616,01	0,00	0,00
Jan 2017	5.435,97	0,00	0,00	Jan 2016	5.882,70	0,00	0,00
Feb 2017	5.092,48	0,00	0,00	Feb 2016	5.837,99	0,00	0,00
Mrz 2017	4.525,59	0,00	0,00	Mrz 2016	4.799,83	0,00	0,00
Apr 2017	2.695,63	0,00	0,00	Apr 2016	2.628,19	0,00	0,00
Mai 2017	2.214,82	0,00	0,00	Mai 2016	1.887,76	0,00	0,00
Jun 2017	566,61	2,94	0,01	Jun 2016	215,70	0,00	0,00
Jul 2017	562,87	1,38	0,00	Jul 2016	183,16	0,00	0,00
Aug 2017	349,14	0,00	0,00	Aug 2016	35,48	0,00	0,00
Summe	32.200,57	4,32	0,01		33.932,62	104,87	0,06
Maximalwert	5.435,97	2,94	0,01		5.882,70	81,77	0,03
Minimalwert	197,21	0,00	0,00		35,48	0,00	0,00
Durchschnittswert	2.683,38	0,36	0,00		2.827,72	8,74	0,00

9.7.7 Anhebung der Heizkurve Sporthalle (IngSoft)

Zum 09.06.2016 wurde die Heizkurve der Sporthalle angepasst, sodass ein geringerer Stromverbrauch des Lüfters zu erwarten war, da nach der Umstellung geringe Laufzeiten erbringen muss, um die gleiche Wärmemenge in den Raum einzutragen.

9.7.7.1 Auswirkungen auf den Verbrauch

In Grafik 9.7-23 werden die Auswirkungen dieser Maßnahme auf den Verbrauch der Sporthalle sehr schnell deutlich. Der Stromverbrauch sinkt wie erwartet, wobei der Wärmebedarf einen wesentlichen Anstieg aufweist. Der Wärmebedarf stieg damit insgesamt um ca. 29 MWh im Vergleich zum Vorjahreszeitraum. Im gleichen Zeitraum sank der Strombedarf um ca. 2,84 MWh. Damit entspricht der Anstieg des Wärmebedarfs um das ca. Zehnfache der Senkung des Strombedarfs. Wie erwartet stehen diese beiden Größen in umgekehrt proportionalem Zusammenhang. Eine monetäre Rentabilität dieser Maßnahme kann also nur unter der Annahme, dass die Stromkosten um das zehnfache höher als die Kosten für den Wärmebezug sind, bestätigt werden. Nach Rücksprache mit der Ingenieurgesellschaft für Planung Energie Umwelt mbH kann der Mehrbedarf an Wärme durch eine vorherige Unterversorgung der Sporthalle mit Wärme erklärt werden, da der Sollwert im Vorjahreszeitraum nicht erreicht werden konnte. Die Grafik 9.7-24 dient der Veranschaulichung des Stromverbrauchs, da so die Einsparungen besser visualisiert werden können.

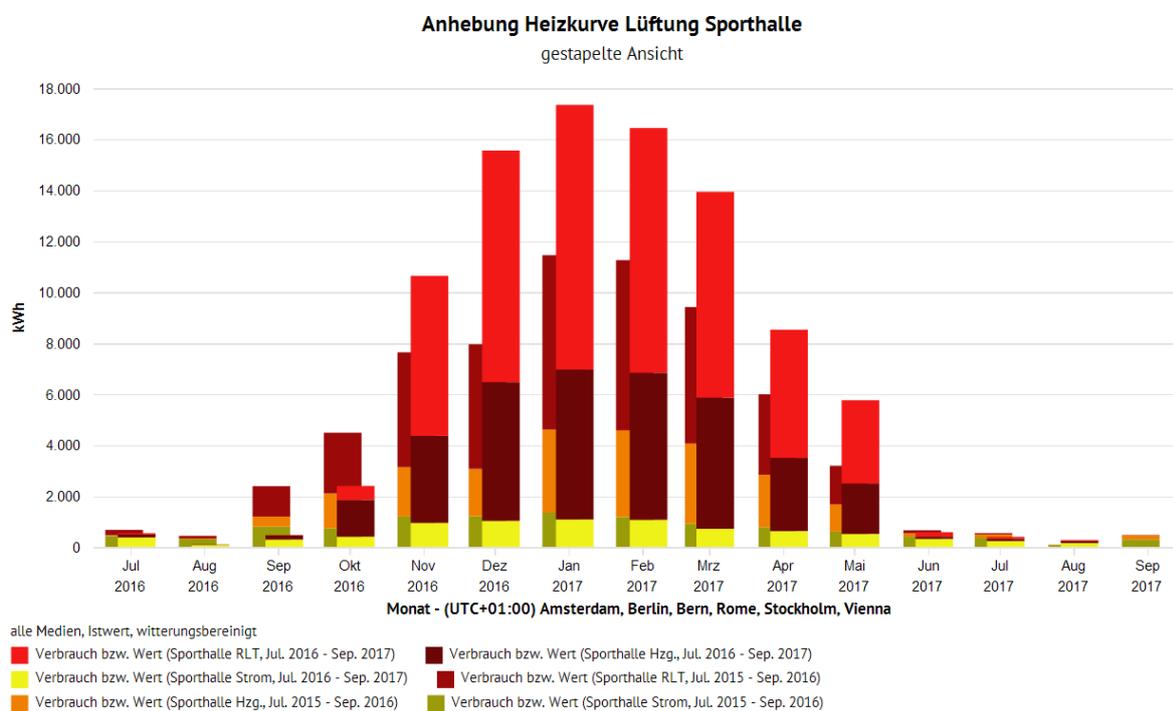


Abbildung 9.7-23: Anhebung Heizkurve Lüftung Sporthalle

Tabelle 9.7-15: Wärme und elektrischer Verbrauch Sporthalle

Monat	Verbrauch bzw. Wert (Sporthalle RLT) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Sporthalle Hzg.) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Sporthalle Strom) [kWh]	Monat	Verbrauch bzw. Wert (Sporthalle RLT) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Sporthalle Hzg.) [kWh]	Verbrauch bzw. Wert (Sporthalle Strom) [kWh]
Jul 2016	48,67	120,62	384,32	Jul 2015	206,62	30,51	442,66
Aug 2016	0,00	15,79	85,99	Aug 2015	99,94	33,85	312,40
Sep 2016	12,78	165,74	302,08	Sep 2015	1.191,78	394,07	809,23
Okt 2016	547,74	1.444,18	413,49	Okt 2015	2.381,66	1.364,07	745,51
Nov 2016	6.273,05	3.412,17	954,93	Nov 2015	4.499,48	1.933,88	1.210,28
Dez 2016	9.081,49	5.437,81	1.035,90	Dez 2015	4.883,65	1.858,60	1.216,67
Jan 2017	10.380,42	5.877,05	1.088,72	Jan 2016	6.836,41	3.261,80	1.353,41
Feb 2017	9.596,46	5.766,01	1.074,68	Feb 2016	6.670,65	3.398,55	1.187,59
Mrz 2017	8.066,15	5.146,57	722,55	Mrz 2016	5.349,31	3.144,79	925,19
Apr 2017	5.024,58	2.871,33	634,56	Apr 2016	3.155,52	2.057,67	785,07
Mai 2017	3.264,49	1.978,76	522,40	Mai 2016	1.508,77	1.071,73	614,29
Jun 2017	172,24	88,03	329,50	Jun 2016	115,22	129,18	420,36
Jul 2017	75,74	86,98	244,50	Jul 2016	48,67	120,62	384,32
Aug 2017	35,53	88,09	163,03	Aug 2016	0,00	15,79	85,99
Sep 2017	-	-	-	Sep 2016	12,78	165,74	302,08
Summe	52.579,36	32.499,13	7.956,65		36.960,46	18.980,86	10.795,04
Maximalwert	10.380,42	5.877,05	1.088,72		6.836,41	3.398,55	1.353,41
Minimalwert	0,00	15,79	85,99		0,00	15,79	85,99
Durchschnittswert	3.755,67	2.321,37	568,33		2.464,03	1.265,39	719,67

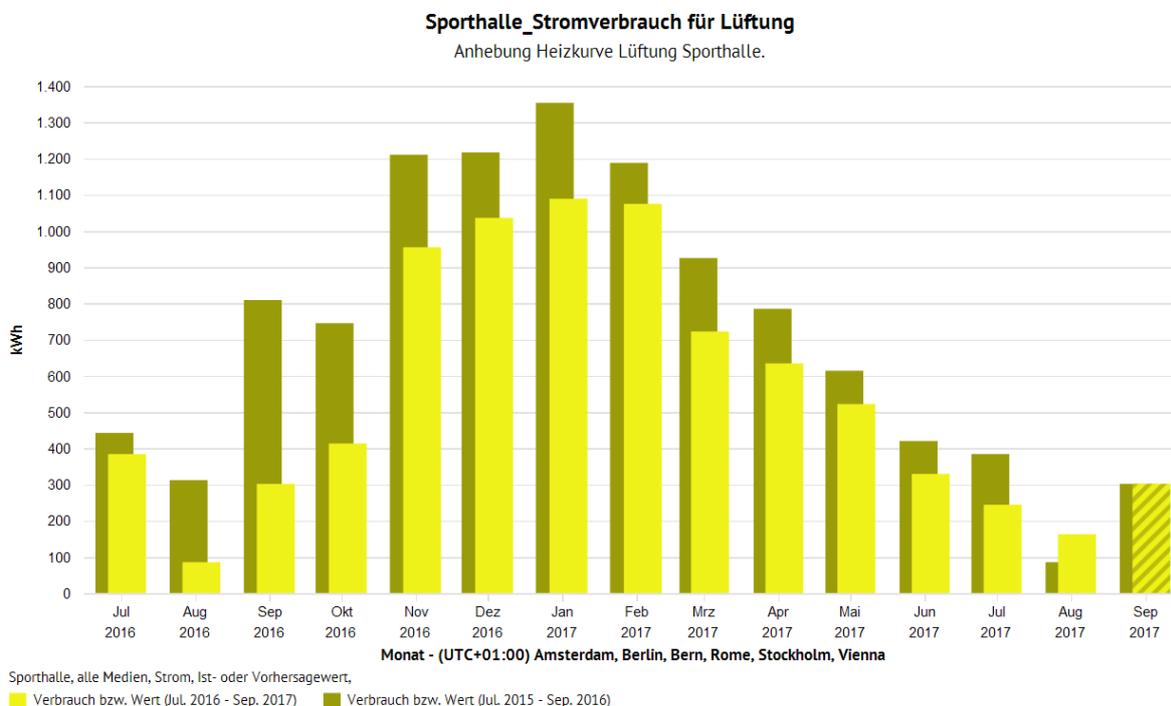


Abbildung 9.7-24: Sporthalle Stromverbrauch für Lüftung

9.8 Schule Mendelssohnstraße

In der Schule Mendelssohnstraße ist die Gebäudeleittechnik von Kieback & Peter. Da diese Firma einer der Projektpartner im Forschungsprojekt ist, wurde hier bei der Umsetzung von Regelstrategien eine einfachere Umsetzung bei neuen Regelstrategien erwartet. Die Umsetzung durch eine Niederlassung hat sich aber als nicht einfach herausgestellt.

Aus der Vorkenntnis des Gebäudes im Rahmen von ModQS wurde eine prädiktive Regelung der Kessel, welche auch deren Leistung an den zu erwartenden Bedarf anpassen kann, für sinnvoll erachtet. Hierfür wurde der Einsatz zusätzlicher Regelventile benötigt. In diesem Zusammenhang sollte auch das Problem schwankender Differenzdrücke, welches bei der Beladung bzw. der Entnahme des Speichers auftritt, verursacht durch zu geringe Querschnitte bei der Einbindung der vier in Reihe geschalteten Einzelspeicher, gelöst werden. Die Kosten der Umrüstung sollten mit 40 % aus dem Etat des Forschungsprojektes gefördert werden. Nach Abwägung der zu erwartenden Kosten und der möglichen Einsparungen kam der Schulbau Hamburg zu dem Schluss, dass eine Kostenübernahme von 60 % nicht akzeptabel sei.

Da die Gebäude der Schule über vier getrennte Heizkreise mit eigener Durchfluss und Wärmemengenmessung verfügt, eröffnete sich die Möglichkeit die Auswirkung einer Einzelraumregelung, basierend auf dem von Kieback & Peter entwickelten Heizkörperthermostaten En:Key zu untersuchen.

9.8.1 Fehler

Tabelle 9.8-1: Relevante Fehler Schule Mendelssohnstraße

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
1	Regelstrategie bei Kessel- ausfall: wenn ein Kessel ausfällt wird der andere nicht nach Bedarf sondern durchgehend angestellt	Trenddaten - Analyse Anlagenbetrieb	Anpassung Regel- strategie	wird nicht beho- ben (Kosten / Nutzen)
2	Ferienabsenkung: in den Ferien wird die Schule durchgehend beheizt	Trenddaten	Einstellung Para- meter	gemeldet
3	Kesseldefekt: Kessel ab- gestellt, da er Geräusche macht	Trenddaten	Reparatur	beho- ben
4	Uhrzeit der GLT/DDC stimmt nicht mit der tatsächlichen Uhrzeit überein	Schaubild GLT	regelmäßiges Ein- stellen	Uhrzeit einges- tellt
5	HK Pavillon wird im Hand- betrieb durchgehend be- heizt. Unterversorgung, nach Absenkbetrieb wurde die Raumtemperatur nicht mehr erreicht.	Trenddaten	Ursache der Un- tersversorgung ermitteln und be- heben	gemeldet

9.8.2 Maßnahmen

9.8.2.1 En:Key Einzelraumregelung

Seitens K&P wurden im Rahmen des Forschungsprojektes Raumsensoren und Heizkörperstellantriebe bereitgestellt um einen Unterheizkreis der Schule Mendelssohnstraße mit dem En:Key System ¹ auszustatten. Der Raumsensor erkennt mit einem Sensor ob der Raum genutzt wird oder nicht. Er lernt das Nutzerverhalten und passt Komfort- und Sparbetrieb daran an. Die Komponenten kommunizieren per Funk, sie benötigen keine Batterien oder externe Stromquellen. Es ist keine Konfiguration der Sensoren oder Antriebe bei Installation notwendig.

Als Folge von ersten Versuchen wurde bei Kieback&Peter ein großes Einsparpotenzial für den Einsatz des En:Key in Schulen gesehen. Da die Schule Mendelssohnstraße über mehrere Heizkreise verfügt, welche mit Wärmemengenzählern ausgestattet sind erschien es sinnvoll eine Überprüfung der Funktionsweise vorzunehmen. Der Heizkreis Klassenhäuser ist in drei Klappenkreise unterteilt, welche einzelne Gebäude versorgen. Für jeden Heizkreis werden zusätzlich die Rücklauftemperaturen erfasst, so dass Änderung durch die Selbstoptimierung der einzelnen Klassenräume gut nachweisbar sein sollten.

PLENUM hat dieses System in der Schule Mendelssohnstraße installiert. Ein Raspberry Pi wurde konfiguriert, so dass dieser die Daten vor Ort empfängt, speichert und täglich über eine Mobilfunkverbindung an einen PLENUM-Server schickt. Die Grundlage für die Verbindung zwischen den auf enocean basierenden En:Key Raumsensoren und dem Raspberry Pi ist ein von K&P geliefertes, in C programmiertes Programm, welches von Plenum an die Anforderungen für die Datenerfassung angepasst wurde.

Folgende Erweiterungen wurden implementiert:

1. Die Daten werden laufend in eine lokale CSV-Datei geschrieben, wobei die Time-stamps in UTC ausgegeben werden, um Probleme bei der Sommerzeit-Umstellung von vornherein zu vermeiden. Zudem sind die Schlüssel der Datenpunkte „menschenslesbar“ codiert, z. B. „01888681_TEMP_IST“.
2. Um jeweils eine Datei mit den kompletten Daten des Vortags versenden zu können, wird die laufende Datei um Mitternacht „gerollt“, d. h. mit einem Datums-Suffix versehen, und eine neue Datei angelegt. So wird der lesende Zugriff auf eine gerade zum Schreiben geöffnete Datei vermieden, was nach unserer Erfahrung bei anderen Systemen zu Problemen führt (es werden gelegentlich unvollständige Zeilen exportiert).
3. Die Datei wird über eine REST-Schnittstelle (POST) täglich auf unseren Server übertragen. Um ein günstiges Mobilfunk-Datenpaket nutzen zu können, wird die CSV-Datei dabei vor dem Versenden gezippt. Um die Integrität der Daten sicherzustellen, gibt der POST-Call einen Hash (eine Art Prüfsumme) der empfangenen Datei zurück, der mit dem lokal erzeugten Hash verglichen wird. Im Fall einer Abweichung wird der Versand wiederholt. Dadurch sind bisher keine Datenlücken aufgetreten und es war kein händischer Eingriff zur Korrektur ungültiger Daten notwendig.

¹Die Funktionsweise des Systems ist in <https://www.enkey.de/fileadmin/media-enkey/pdf/Installationsanleitung.pdf> erklärt.

4. Um bei Bedarf auch interaktiv arbeiten zu können (z. B. zum Anlernen neuer Datenpunkte), kann das Programm entweder als Server oder im interaktiven Modus (der im Hintergrund weiter Daten in die CSV-Datei schreibt) gestartet werden. Um Datenlücken zu verhindern, muss sichergestellt werden, dass immer eine Instanz des Programms aktiv ist. Hierfür überprüft ein „Watchdog“-Skript ständig, ob das Programm läuft und startet es im Server-Modus, falls das nicht der Fall ist. Dadurch wird es auch nach einem Crash des Programms oder einem Reboot des Rechners automatisch gestartet. Der interaktive Modus wird durch ein Start-Skript initiiert, das den Server beendet und den interaktiven Modus startet, während es temporär den Watchdog in einen Pausen-Modus versetzt. Nach dem Beenden des interaktiven Modus wird der Server vom Watchdog automatisch neu gestartet. Durch dieses Verfahren sind auch bei intensiver Nutzung des interaktiven Modus keine Datenlücken aufgetreten.
5. Um eine sichere Fernwartung zu ermöglichen, baut der RaspberryPi zu Bürozeiten einen Reverse-SSL-Tunnel zum PLENUM-Server auf, über den ein SSH-Zugriff möglich ist. Ein allgemeiner Zugriff von außen auf den RaspberryPi ist nicht möglich, da der eingesetzte Surfstick eine Firewall zur Verfügung stellt. Die Fernwartung wird genutzt, um Software-Updates aufzuspielen und bei Feriende händisch in die Steuerung einzugreifen.

Auf diesem Verbindungsweg ist es ebenfalls möglich auf die Sensoren zuzugreifen und Einstellungen von ihnen zu verändern. Die Komponenten konnten ohne Probleme in den Räumen der Pavillons 17-20 verbaut werden. Dabei wurden je Klassenraum 4 Heizkörper, je Vorraum 1 Heizkörper und je Nebenraum 1 Heizkörper umgerüstet, in der Summe somit 24 Heizkörper. Für den betrachteten Bereich ist ein eigener Klappenkreis vorhanden, siehe Abbildung 9.8-1.

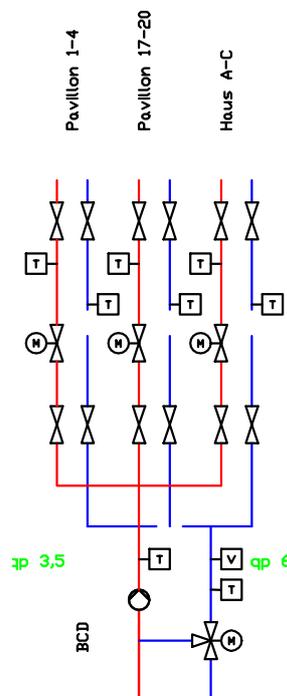


Abbildung 9.8-1: Hydraulikschema Schule Mendelssohnstraße (Auszug)

Die Funkreichweite von enocean Komponenten ist begrenzt. Um die Daten von allen

Räumen sammeln zu können, mussten zwei Funkrepeater vor Ort installiert werden. Die Daten wurden in die Visualisierung von PLENUM mit eingebunden. In Abbildung 9.8-2 ist der Zustand des Systems für den Klassenraum des Pavillon18 dargestellt. Dabei ist die Zuordnung zwischen Wert im Carpetplot zu dem Zustand wie

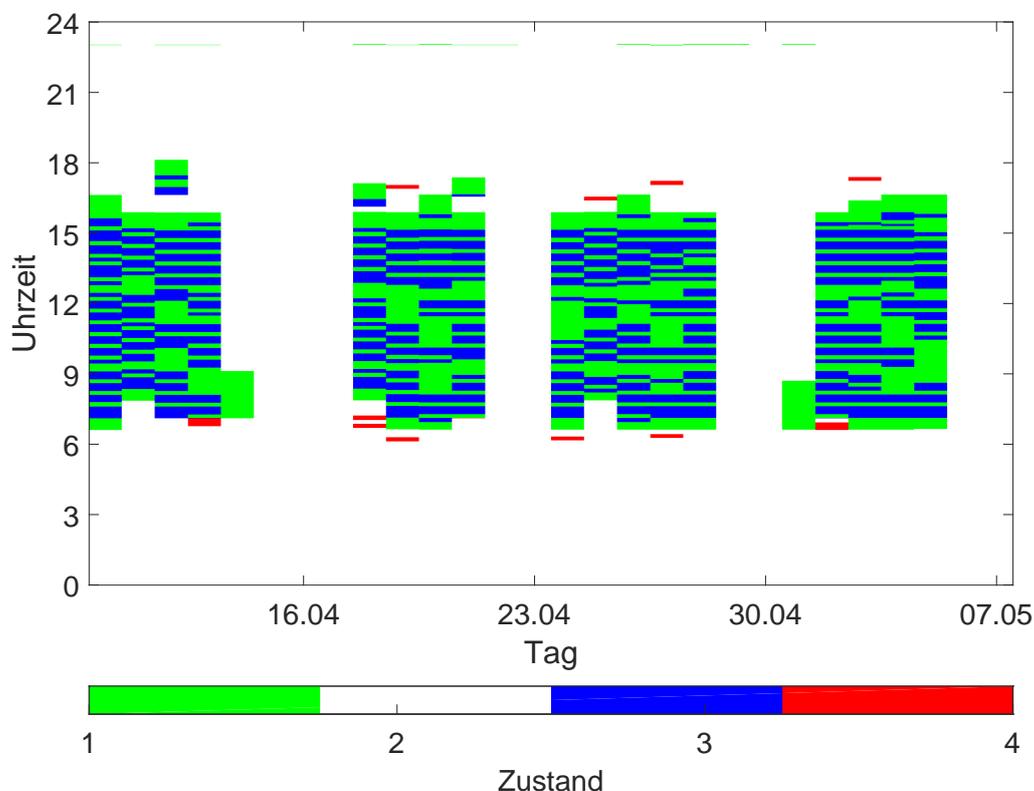


Abbildung 9.8-2: Zustand im Pavillon 18

folgt:

- 1: keine Bewegung detektiert und Raum im Komfortmodus
- 2: keine Bewegung detektiert und Raum im Sparbetrieb
- 3: Bewegung detektiert und Raum im Komfortmodus
- 4: Bewegung detektiert und Raum im Sparbetrieb

Die Idealsituation ist, dass nur Zustand 2 und 3 vorkommen. Im Zustand 1 wird der Raum unnötig geheizt und im Zustand 4 ist der Raum ggf. ausgekühlt, obwohl er genutzt wird. Ist 3 Tage keine Anwesenheit in einem Raum, so wechselt der Regler in den Abwesenheitsmodus und der Raum wird am kommenden Tag nicht mehr auf Komforttemperatur geheizt. Fällt ein freier Tag in der Schule auf einen Montag oder Freitag so wird am folgenden Unterrichtstag der Raum nicht rechtzeitig aufgeheizt, der Komfortmodus startet erst, wenn eine Person den Raum betritt. Die Daten der Abbildung 9.8-2 starten an einem Montag. In der ersten Woche sind 4 Nutzungstage, am Freitag 14.4. wird der Raum geheizt, aber da dies der Karfreitag ist, findet kein Schulbetrieb statt. Um 9 Uhr wechselt der Raum in den Sparbetrieb. Am Dienstag nach Ostern wird der Raum morgens betreten, der Regler befindet sich im Abwesenheitsmodus, der

Raum ist nicht geheizt. Der Feiertag am 1. Mai fällt auf einen Montag, auch an diesem Tag wird der Raum aufgeheizt aber es findet keine Nutzung statt. Am darauffolgenden Dienstag wird die Klasse erst nach Nutzungsbeginn geheizt. Somit ist es empfehlenswert, für den Schulbetrieb den Abwesenheitsbetrieb erst nach 4 Tagen Abwesenheit zu starten.

Schlussfolgerungen

Im Allgemeinen stimmen die erlernten Nutzungszeiten gut mit den Anwesenheitszeiten überein. In den Randbereichen am Morgen oder am Nachmittag kommt es zu Abweichungen, die sich zum großen Teil aus unterschiedlichen oder individuellen Nutzungen begründen werden.

Die Ferienzeiten sollten per Fernzugriff programmiert werden bzw. zum Ferienende einmal per Fernzugriff die Präsenz aktiviert werden, damit der Regler in den Normalbetrieb wechselt und am ersten Schultag die Klassenräume geheizt sind.

Die Kommunikation der einzelnen En:Key-Module mit dem Raspberry Pi und die Kommunikation mit dem Server für die Datenerfassung läuft seit einem halben Jahr stabil und unproblematisch. Auch ist es in der Schule zu keinen Problemen mit Vandalismus gekommen.

Bei einer Abwesenheit von mehr als zwei Tagen schaltet sich das System in den Ferien/Urlaubsmodus. Dies erscheint problematisch, da es häufiger vorkommt dass an mehr als zwei aufeinander folgenden Tagen der Schulbetrieb nicht stattfindet. Besonders deutlich wird dies zu Ostern (Karfreitag-Ostermontag) und Pfingsten (Samstag-Montag). Aber auch an anderen Feiertagen wie beispielsweise 1. Mai und 3. Oktober kann es zu Problemen kommen wenn diese auf einen Freitag oder Montag fallen. Der selbstlernende Algorithmus sollte im Hinblick darauf angepasst werden.

Weiterhin wäre es wünschenswert, wenn der En:Key von der GLT angesprochen werden könnte, um einen rechtzeitiges Aufheizen nach den Ferien sicherzustellen.

9.9 LMT-Group

Bei der Versorgung der LMT-Gebäude kommt es zeitweilig zu Unterversorgungen. Die Ursache hierfür sind Probleme der Wärmeverteilung und nicht eine zu geringe Erzeugungsleistung. Allerdings erfolgt auch der Betrieb der Wärmeerzeugungsanlage in der Zentrale und der Halle 6 nicht automatisiert nach den Wärmeanforderungen und behindert auf diese Weise eine ausreichende und sparsame Wärmeerzeugung.

Durch eine verbesserte Erfassung der Verbraucher und heizungsverteiler können hydraulische Mängel erkannt und behoben werden. In der Folge sinken die Volumenströme in der Ringleitung sowie die Rücklauftemperaturen. Gleichzeitig steigt die Transportkapazität der netze und die Wärme kann mit einem geringeren Aufwand an Pumpleistung bereitgestellt werden.

Zur Verbesserung der Informationslage wurden Durchflusssensoren installiert und zusätzliche Temperaturmesspunkte aufgeschaltet.

Da die Abstimmung des Einsatzes der Heizkessel verbesserungsbedürftig ist, wurden durch die HAW und PLENUM Vorschläge für eine verbesserte Kesselregelung auf der Basis dezentraler Regler entwickelt. Diese konnten allerdings nicht in die Praxis überführt werden.

9.9.1 Fehler

Tabelle 9.9-1: Relevante Fehler LMT-Group

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
1	Ausfall Kesselregelung	Trendlogs	Wartung	behoben
2	Rücklauftemperaturen steigen bei steigender Außentemperatur	Scatterplots	Regler repariert, Bypässe geschlossen	teilweise
3	Volumenstrommessungen nicht Kalibriert da keine Inbetriebnahme erfolgt	Begehung	Wartung / Inbetriebnahme	nicht behoben
4	Deckenlüfter haben keine Volumenstromregelung	Begehung	Einbau neuer Deckenlüfter	nicht behoben
5	nicht benötigte Pumpe wurde nicht entfernt	Begehung	Entfernen	nicht behoben

9.9.2 Visualisierung der Volumenstromverteilung bei der LMT Group (HAW)

Das folgende Kapitel beschreibt ein Tool zur Visualisierung der Volumenstromverteilung in der Heizungsanlage der LMT Group in Schwarzenbek, das an der HAW Hamburg während der Projektlaufzeit entwickelt wurde. Bei der betrachteten Anlage werden mehrere Werkshallen und Bürogebäude auf dem Werksgelände über eine Ringleitung versorgt. Drei verschiedene Wärmeerzeuger, zwei Heizzentralen mit Heizkesseln und eine Wärmerückgewinnung der Kompressoranlage, speisen in die Ringleitung

ein. Anders als in gerichteten Verteilerstrukturen gibt es hier aufgrund der Konstruktion als Ringleitung keine vorgegebene Flussrichtung in dem Leitungssystem. Je nach Verbrauchs- und Einspeisesituation kann es zu einer Umkehr des Flusses in einigen Bereichen der Anlage kommen. Die Verteilung der Volumenströme im Versorgungsring wird durch den Betrieb der Erzeuger- und Verbraucherpumpen bestimmt. Eine Änderung der Leistung einer dieser Pumpen, erzeugt eine Änderung der Verteilung des Volumenstroms im Ring und kann dazu führen, dass sich die Flussrichtung an einigen Punkten umkehrt.

Der Volumenstrom in der Ringleitung wird an fünf Messstellen auf dem Werksgelände mithilfe von Wärmemengenzählern gemessen. Die Struktur der Anlage soll daher im Folgenden vereinfacht als Fünfeck betrachtet werden, wie in Abbildung 9.9-1 dargestellt.

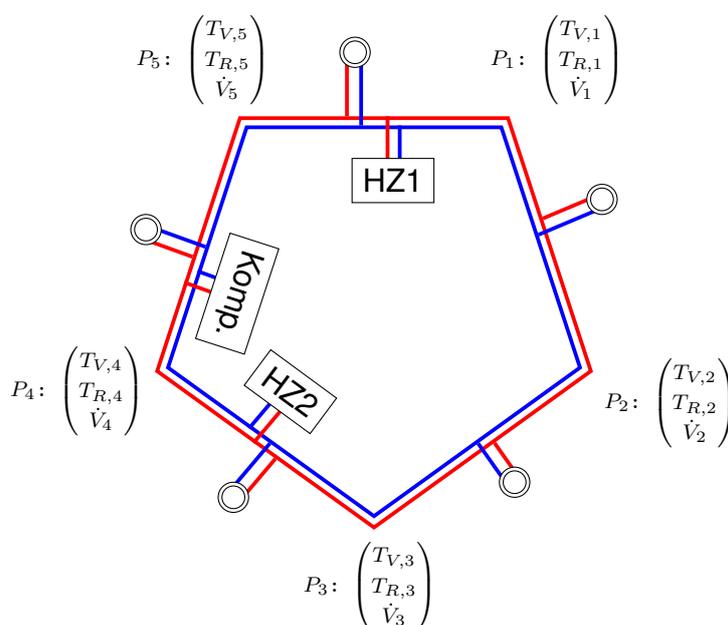


Abbildung 9.9-1: Vereinfachtes Strukturbild der Anlage

Die Ecken des Fünfecks werden durch die Wärmemengenzähler P_1, \dots, P_5 dargestellt. D.h. an diesen Stellen sind Messinformationen über den Volumenstrom verfügbar. Die Erzeuger sind als Heizzentrale (HZ) 1 und 2 sowie als Kompressoranlage (Komp.) eingezeichnet. An den Kanten des Fünfecks nehmen meist mehrere Verbraucher Wärmeleistung ab. Die Verbraucher an einer Kante des Fünfecks sind hier in der vereinfachten Darstellung jeweils zu einem Verbraucher zusammengefasst. Die jeweilige Flussrichtung in den Messpunkten wird über das Vorzeichen des Messwerts abgebildet. Ein positives Vorzeichen bedeutet einen Fluss im Uhrzeigersinn, ein negatives Vorzeichen des Messwertes bezeichnet dementsprechend einen Fluss entgegen dem Uhrzeigersinn. Betrachtet man die Messdaten für die Volumenströme der fünf Messpunkte in Zeitreihendarstellung, wie in Abbildung 9.9-2 für den Januar des Jahres 2016 gezeigt, lässt sich die Volumenstromverteilung für einen bestimmten Zeitpunkt aus den Messdaten ablesen, jedoch nicht sehr einfach überblicken. Auch ein Verlauf über die Zeit lässt sich nur schwer erfassen. Daher wurde im Verlauf des Projektes OBSERVE mithilfe eines Hilfswissenschaftlers ein Visualisierungstool entwickelt, um die Volumenstromverteilung in der Ringleitung übersichtlich darzustellen. Das Ziel ist, über das Tool

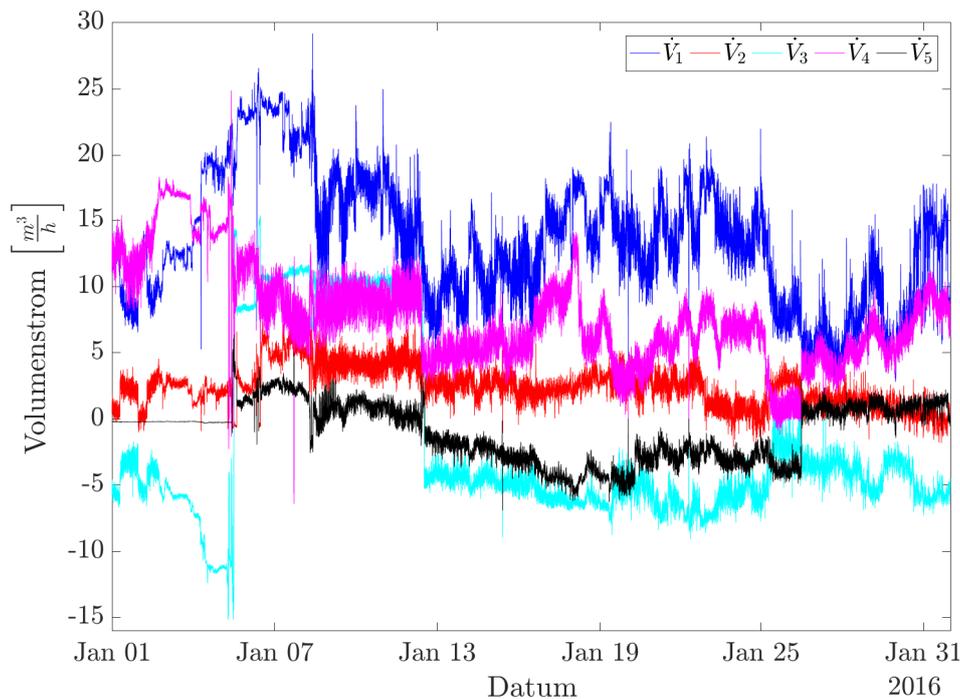


Abbildung 9.9-2: Messdaten der Volumenströme in der Ringleitung

Tabelle 9.9-2: Zuordnung der Datenbankbezeichner zu den Messstellen

Messstelle	Datenbankbezeichner
P_1	c0044
P_2	c0070
P_3	c0178
P_4	c0196
P_5	c0062

einen schnellen und einfachen Überblick über den Betriebszustand der Anlage zu erhalten, um so das Anlagenverhalten besser analysieren zu können. Das Tool wurde in MATLAB programmiert und stellt dem Anwender eine Benutzeroberfläche für die Visualisierung der Volumenströme zur Verfügung. Das Tool arbeitet mit Daten aus der Messdatendank des Projektes OBSERVE, die von dem Projektpartner IngSoft GmbH bereitgestellt wird. Die Daten werden in MATLAB über die Schnittstelle des Measurement Viewers zur Verfügung gestellt, der im Bericht zum Arbeitspaket 2, Kapitel 2.5.2 vorgestellt wurde. Das Tool arbeitet mit der Datenstruktur, wie sie vom Measurement Viewer erzeugt wird. Innerhalb des Tools wird die Ringleitung auch über das vereinfachte Strukturbild als Fünfeck dargestellt, wie in Abbildung 9.9-3 zu erkennen ist. Für die einzelnen Messpunkte sind die Bezeichner des Volumenstromdatenpunkte aus der Datenbank angegeben. Die Zuordnung zu den Messstellen aus Abbildung 9.9-1 ist in Tabelle 9.9-2 dargestellt.

Zur Visualisierung der Daten gibt der Anwender zunächst einen Zeitraum an, in dem er die Daten betrachten möchte. In der Benutzeroberfläche wird daraufhin zunächst

für einen Zeitpunkt die Volumenstromverteilung im Ring anhand von Pfeilen an den jeweiligen Messpunkten angezeigt. Dabei gibt die Pfeilrichtung die Volumenstromrichtung zu dem gewählten Zeitpunkt an. Neben der Richtung wird auch der Betrag des Volumenstroms bei der Darstellung des Pfeils berücksichtigt, indem er die Dicke und die Länge des Pfeils beeinflusst. Je größer der Volumenstrom zu dem gewählten Zeitpunkt, desto länger und dicker ist der Pfeil. Um auch andere Zeitpunkte betrachten zu können, ist ein Schieber in der Oberfläche vorgesehen, über den Messwerte zu anderen Zeitpunkten aus dem zuvor geladenen Zeitraum ausgewählt werden können. Dies ermöglicht dem Anwender Veränderungen der Verteilung des Volumenstroms über die Zeit, d.h. in einem zeitlichen Verlauf, zu betrachten. Abbildung 9.9-3 zeigt die Visualisierung der Verteilung der Volumenströme in der Ringleitung der LMT Group für zwei verschiedene Zeitpunkte, die über die entsprechende Schieberstellungen ausgewählt wurden.



(a) 6. Januar 2016, 18:00 Uhr

(b) 23. Januar 2016, 13:00 Uhr

Abbildung 9.9-3: Visualisierung der Volumenströme in der Ringleitung zu verschiedenen Zeitpunkten

Der Vergleich der verschiedenen Darstellung der Volumenstromverteilung in den Abbildungen 9.9-2 und 9.9-3 zeigt, dass sich der Betriebszustand der Anlage bezüglich der Verteilung der Volumenströme in dem entwickelten Visualisierungstool deutlich schneller und einfacher überblicken lässt, als in der zuvor gezeigten Zeitreihendarstellung. Somit eignet sich das Werkzeug sehr gut um das vergangene Anlagenverhalten aus Messdaten zu analysieren.

9.9.3 Maßnahmen

Die Wärmeversorgung der Gebäude erfolgt über eine Ringleitung mit drei Einspeisungspunkten. In der Heizungszentrale befinden sich drei Gaskessel, in der Halle 6 befindet sich ein weiterer Gaskessel. Die Heizkessel werden von Hand ein- und ausgeschaltet. Die Kompressorabwärmeeinspeisung ist dauerhaft in Betrieb. Die Querschnitte in der Ringleitung begrenzen die maximal förderbare Wassermenge. Abhängig von

der Temperaturspreizung im Netz kann es daher zu Versorgungsengpässen bei einigen Verbrauchern kommen.

Die wirksamste Maßnahme zur Steigerung der Transportkapazität wird durch eine Absenkung der Rücklauftemperatur der Verbraucher erreicht. Eine Absenkung der Rücklauftemperatur vergrößert auch die mögliche Kompressorabwärmenutzung.

Die Rücklauftemperaturen der Verbraucher werden nur sehr lückenhaft erfasst. Sie können teilweise indirekt aus den Rücklauftemperaturen im Netz erschlossen werden. Die im Rahmen des Forschungsprojektes OBSERVE beabsichtigte Ausweitung der Messpunkte für Rücklauftemperaturen, Durchflüsse und Drücke hat nicht stattgefunden. Dies erschwert eine zielorientierte Verbesserung der hydraulischen Bedingungen.

Als Referenz für einen ordnungsgemäß betriebenen Verbraucher kann die Einspeisung der Halle 5 dienen, wie die Abbildungen 9.9-4 und 9.9-5 zeigen.

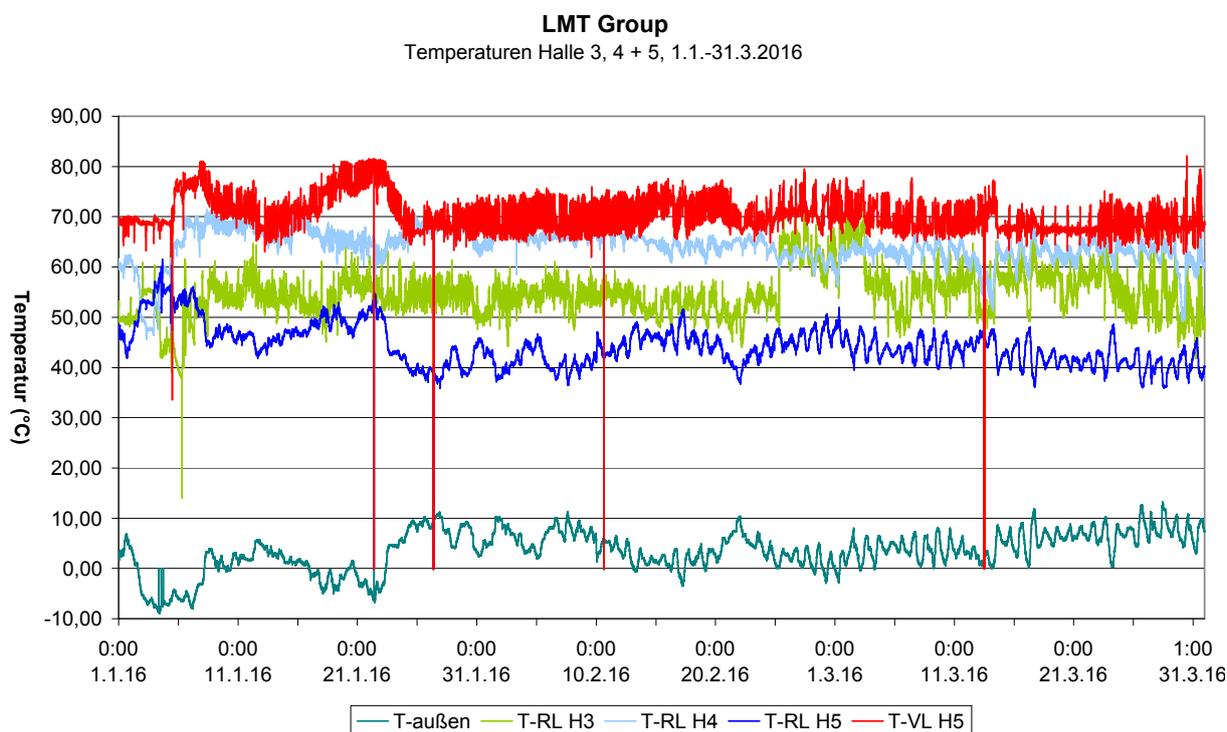


Abbildung 9.9-4: Vor- und Rücklauftemperaturen Halle 3, 4 + 5, 1.1.-31.3.2016

Durch den Ausbau der hydraulischen Weiche in der Versorgung des Kundenzentrums konnte die Rücklauftemperatur am Verteiler der Zentrale abgesenkt werden. Diese sind aber immer noch insgesamt zu hoch. Sie können aber nicht bei den Kesseln genutzt werden, da unregulierte Kesselpumpen und eine hydraulische Weiche zwischen Rücklaufsammler in der Verwaltung und den Kesseln dies verhindern. Eine Brennwertnutzung ist so nicht möglich.

Durch eine verbesserte Regelung der Einspeisepumpen in der Verwaltung konnte der Differenzdruck im Netz verringert und die eingespeiste Wassermenge erhöht werden, wie die Abbildungen 9.9-6 und 9.9-7 erkennen lassen.

Die Höhe der Kompressorabwärmeeinspeisung ist stark von der Rücklauftemperatur in der Ringleitung abhängig. Der Zusammenhang ist praktisch linear wie die Abbildung 9.9-8 zeigt. Sinkt die Rücklauftemperatur von 60 auf 50 °C werden bei voller Kompressorleistung zusätzlich 40 kW eingespeist. Es sollten also möglichst niedrige Rücklauftemperaturen in der Ringleitung angestrebt werden auf diese Weise könnten 60-70 kW

LMT Group
 Temperaturen vs. T-außen, 1.1-31.3.2016

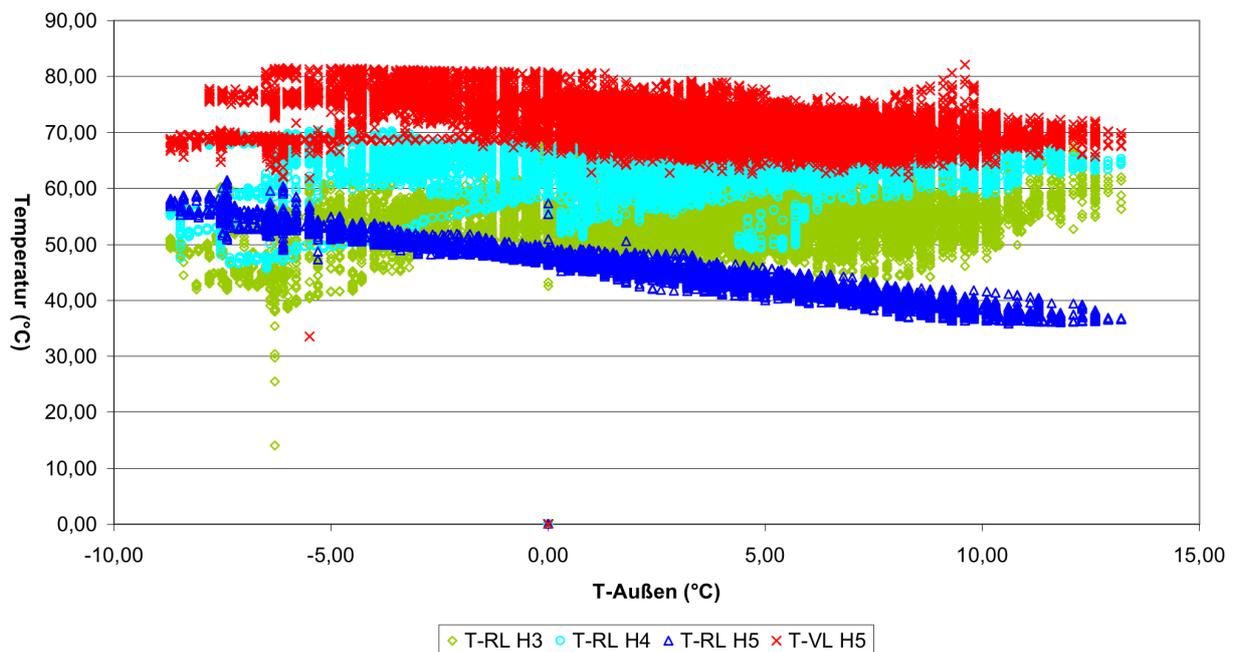


Abbildung 9.9-5: Temperaturen vs. Außentemperatur Halle 3, 4 + 5, 1.1.-31.3.2016

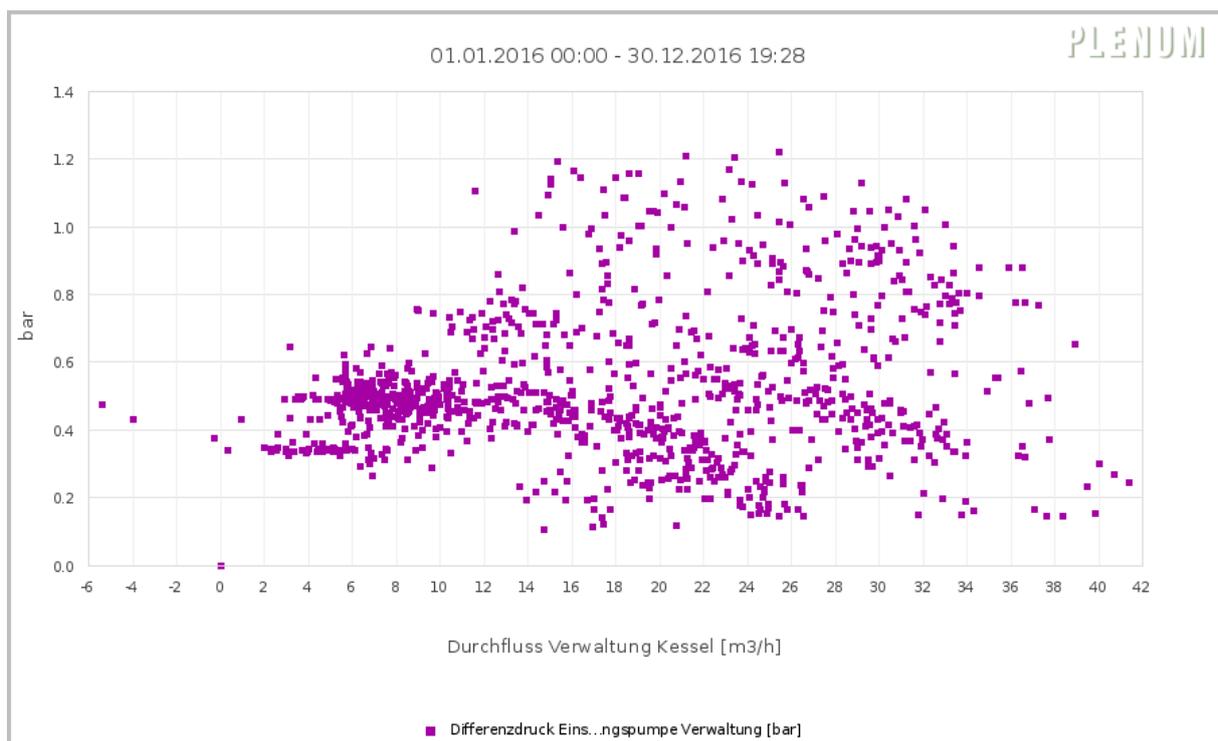


Abbildung 9.9-6: Differenzdruck vs. Durchfluss Einspeisung Zentrale 2016

kostenlos aus der Kompressorabwärme eingespeist werden. Darüber hinaus sinkt die Pumpenleistung der Einspeisepumpen in der Heizungszentrale, da weniger Wasser gefördert werden muss. Außerdem kann die Leistung für die Kühlung der Kompressoren (Lüfter- und Pumpenleistung) eingespart werden.

Bedingt durch die ungenügende Leistungsregulierung der Heizungskessel kommt es

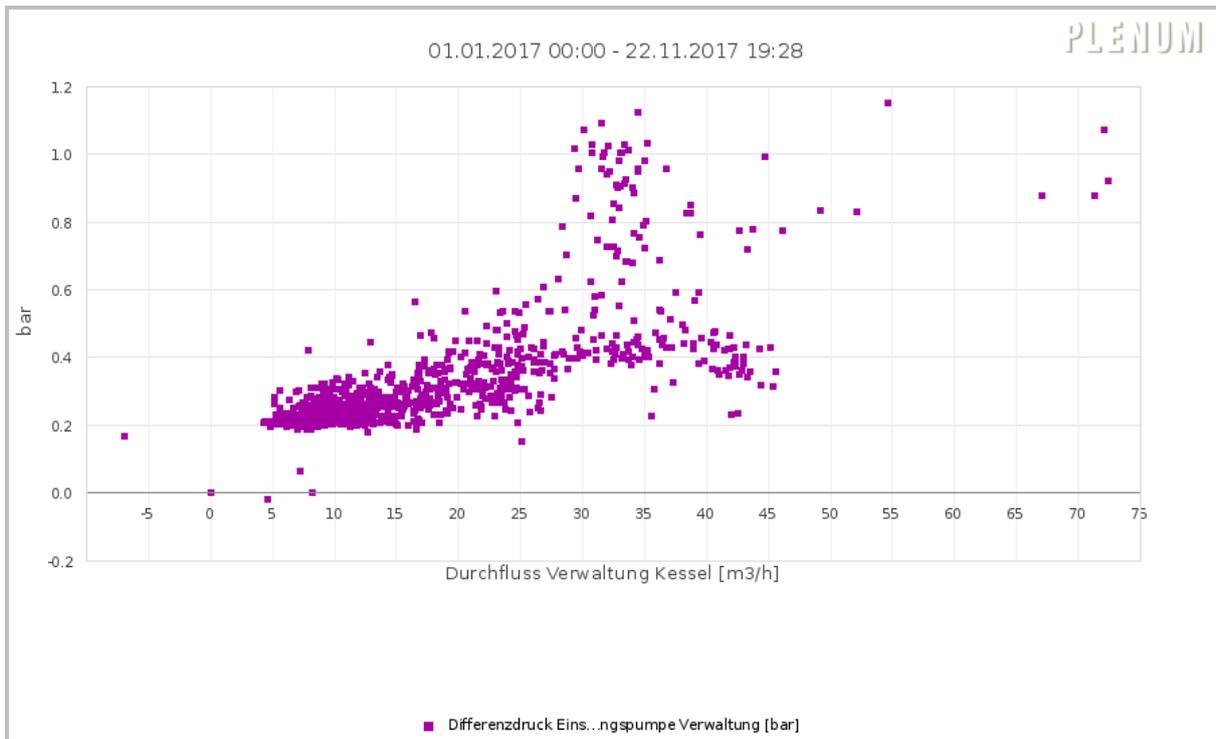


Abbildung 9.9-7: Differenzdruck vs. Durchfluss Einspeisung Zentrale 2017

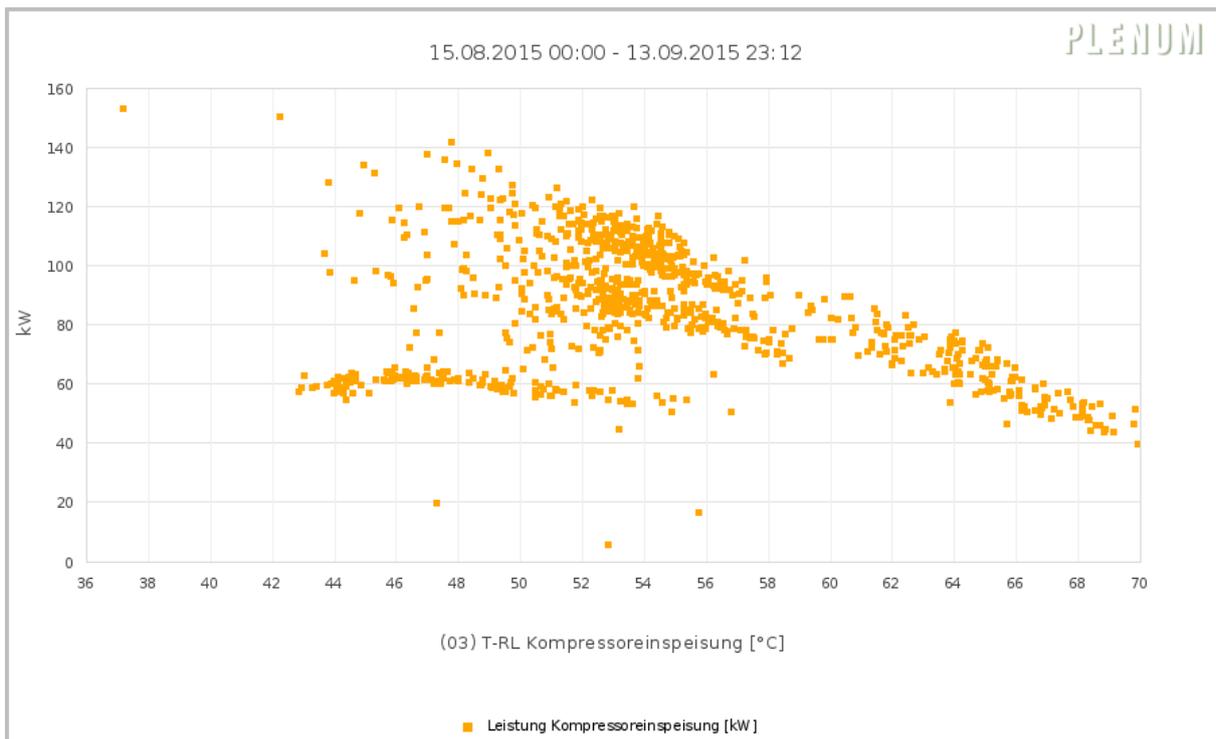


Abbildung 9.9-8: Leistungseinspeisung vs. Rücklauftemperatur

zu einem Takten des Brenners von etwa 6x pro Stunde, wie die Abbildung 9.9-9 zeigt. Dadurch kommt es auf das Jahr hochgerechnet zu 20.000 - 30.000 Starts. Dies ist mit Spülverlusten und Verschleiß an den Brennern verbunden, welche vermeidbar wären. Eine besondere Anforderung für die Wärmeerzeugung ergibt sich aus den, besonders im Frühjahr, stark schwankenden Tageslasten. Hier wäre es beispielsweise sinnvoll am

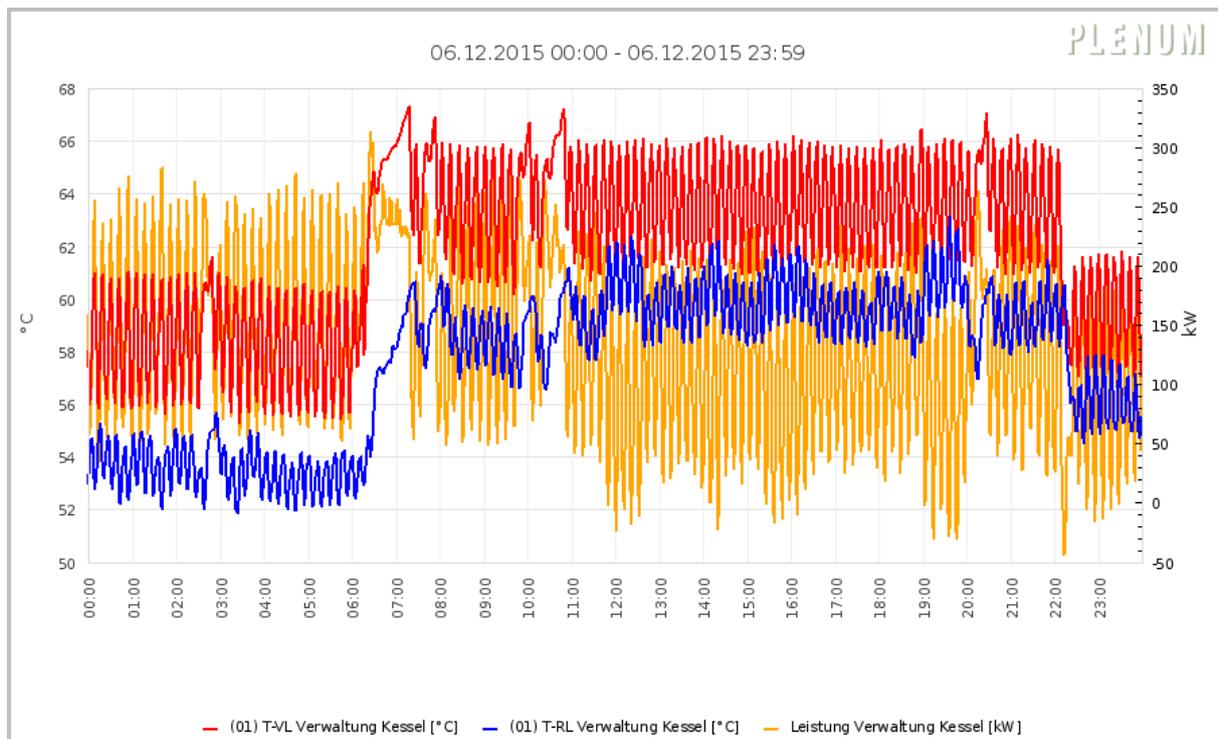


Abbildung 9.9-9: Kesselbetrieb am 6.12.2015

frühen Morgen den Heizkessel in der Halle 6 als Unterstützung einzusetzen und am Vormittag wieder außer Betrieb zu nehmen. Dafür wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein Vorschlag durch die HAW entwickelt, dieser wurde aber nicht umgesetzt.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Einbindung des Heizkessels nicht richtig funktioniert. Sinkt die Einspeisung aus dem Kessel kommt es zu einem Anstieg in der Rücklauftemperatur des Lagers in Halle 8. Insbesondere wenn die Einspeisung endet kommt es zu einem massiven Anstieg der Rücklauftemperatur, wie die Abbildungen 9.9-10 und 9.9-11 erkennen lassen. Dieser Anstieg wirkt sich negativ auf die Einspeisung der Abwärme der Kompressoren aus, wie die Abbildung 9.9-12 verdeutlicht. Durch die Fehler bei der Einspeisung verringert sich die mögliche Kompressorabwärmenutzung um 30-40 kW.

In der Abbildung 9.9-10 ist auch zu erkennen, dass die Vorlauftemperatur des Kessels starken kurzfristigen Schwankungen unterliegt. Der Kessel taktet. Zeitweilig beträgt die Dauer der Taktung nur 8 Minuten. Diese häufigen Taktungen, welche bei positiven Durchflüssen auch im Lager beobachtet werden, führen auch zu Problemen bei nachgeordneten Regelkreisen, etwa von statischen Heizkreisen oder Lüftungsanlagen. Außerdem sind sie nachteilig für den Energieverbrauch sowie die die Wartungs- und Instandhaltungskosten.

LMT Group
Kesseleinspeisung, 27.2.-1.3.2017

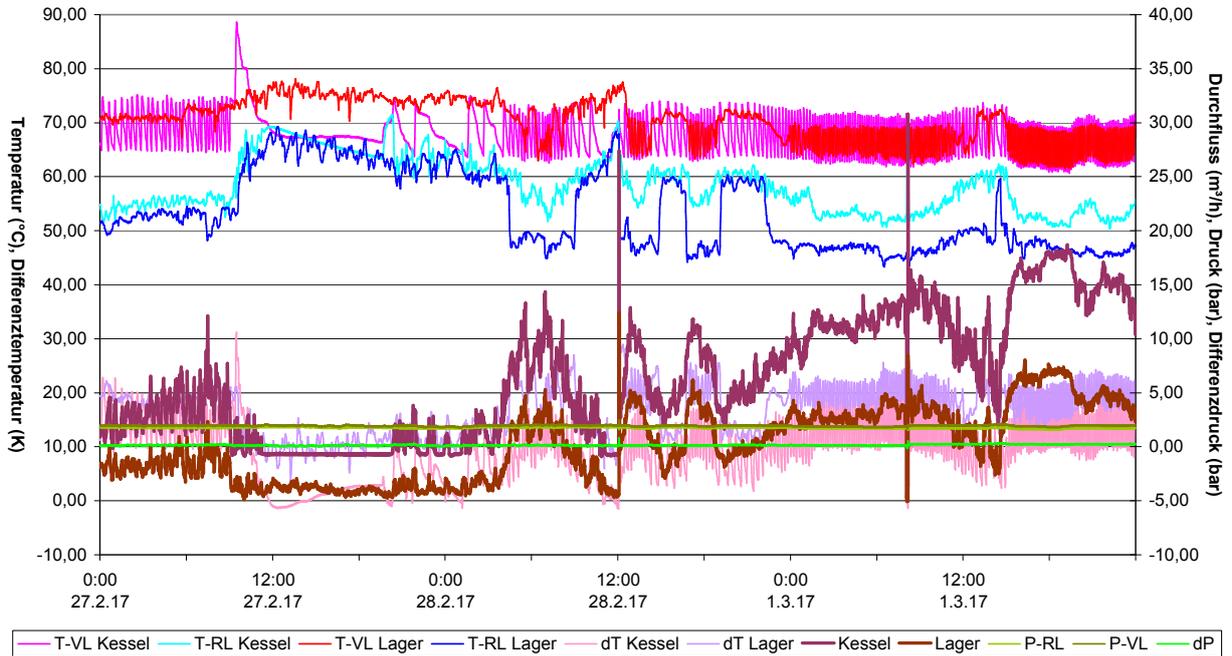


Abbildung 9.9-10: Temperaturen + Durchflüsse Kessel+Lager, 27.2.-1.3.2017

LMT Group
Kesseleinspeisung vs. T-RL Lager

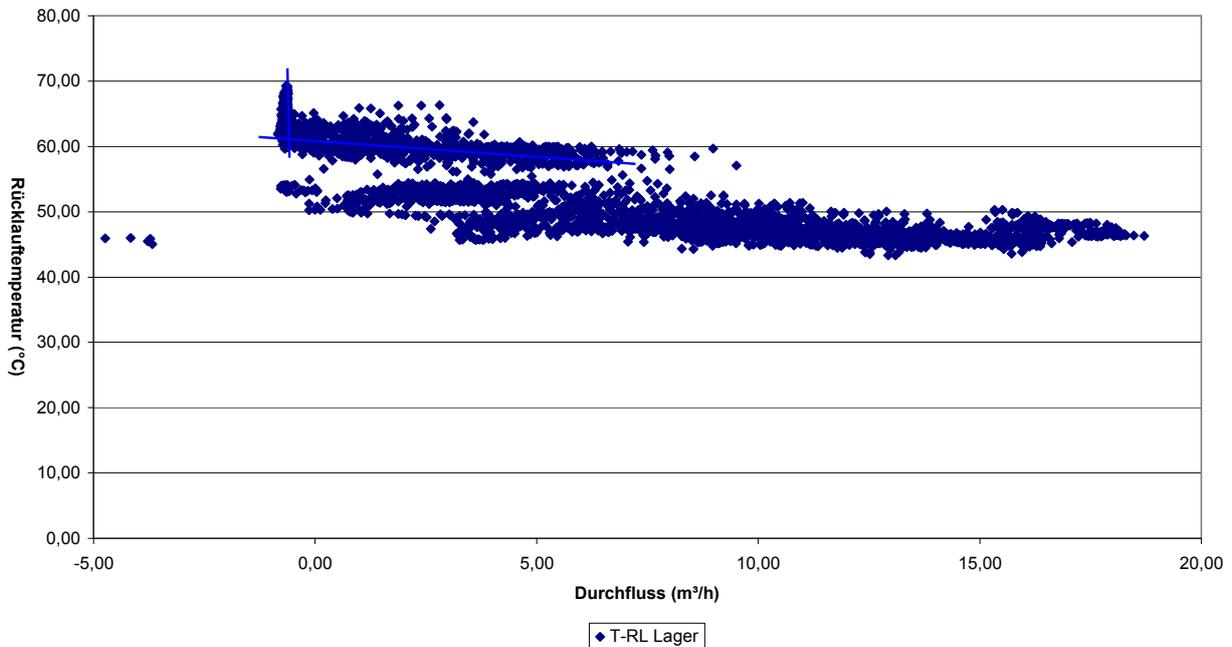


Abbildung 9.9-11: T-RL Lager vs. Kesseleinspeisung Halle 6, 27.2.-1.3.2017

LMT Group

Kompressoreinspeisung vs. Durchfluss Kessel, 27.2.-1.3.2017

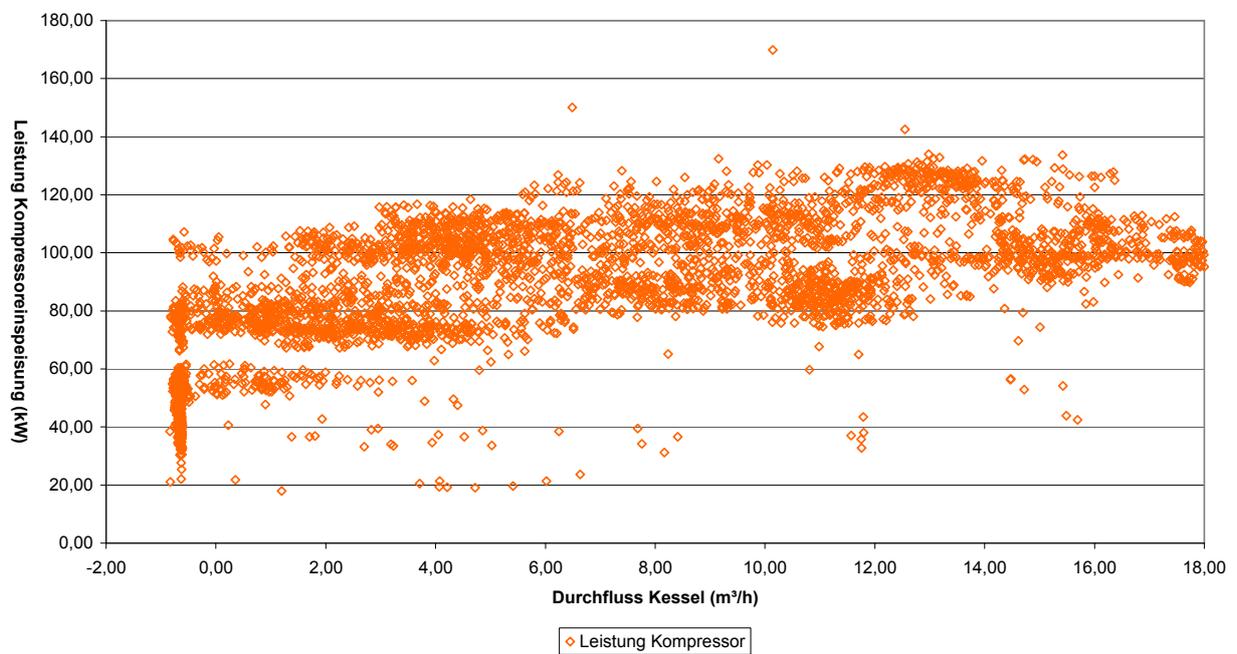


Abbildung 9.9-12: Kompressorleistung vs. Kesseleinspeisung Halle 6, 27.2.-1.3.2017

9.10 Kieback & Peter Zentrale Berlin (ISE)

Bei der Hauptverwaltung von Kieback&Peter in Berlin handelt es sich um ein typisches Nichtwohngebäude, welches als Büro- und Verwaltungsgebäude konzipiert wurde. Das 7-geschossige Bestandsgebäude wurde Anfang der 1990er Jahre in Form eines T-errichtet und beinhaltet in erster Linie Einzel- und Gruppenbüros. Neben Besprechungsräumen in den einzelnen Etagen, sind im 5. OG zusätzlich großflächige Schulungsräume, die mit RLT-Anlagen ausgerüstet sind. Alle Räume verfügen über raumhohe Fensterverglasung die mit aussenliegenden, manuell zu bedienenden Jalousien als Sonnenschutz versehen sind. In der obersten Etage (Dachgeschoß) befindet sich ein Küchen-/Kantinenbereich, der einen Zugang zur teilweise offenen Dachterrasse hat. Das Gebäude ist komplett unterkellert und mit zwei Tiefgaragebenen.

Wärme-, Kälte- und Lüftungskonzept

Wärmeseitig wird das K&P-Gebäude mit zwei 2-stufigen Ölkesseln der Fa. Buderus (Kessel 1: 140 kW, Kessel 2: 230 kW) versorgt die durch die nachgeschalteten Verbraucher angefordert werden. Diese setzen sich aus den angeschlossenen Heizkreisen mit Heizkörpern vom EG bis ins 6.OG, den RLT-Anlagen für Schulungsräume und Küche/Kantine, sowie einer zentralen Warmwasserbereitung (Warmwasserbereitung) zusammen. Bei Anforderung über die Warmwasserbereitung im Winterbetrieb wird ein Mindestsollwert vorgegeben. Im Sommer wird die Warmwasserbereitung über eine Elektro-Heizpatrone betrieben. Für die Kälteversorgung der RLT-Anlagen mit 6/12°C Kaltwasser dienen drei Kompressionskältemaschinen à 45 kW, die sich auf dem Dach des Gebäudes befinden.

Gebäudeautomation und Facility Management

Die regelungs- und steuerungstechnischen Aufgaben für Heizung, Lüftung und Kühlung werden von hauseigenen Kieback&Peter Produkten realisiert. Hierzu gehören neben der Sensorik, Aktorik und Automationsstationen auch eine übergeordnete Kieback&Peter-Gebäudeleittechnik (GLT). Diese übernimmt dabei die Management-Ebene, die sowohl als Bedienebene für den laufenden Betrieb als auch zur Visualisierung und Archivierung der auflaufenden Prozessdaten verwendet wird.

Die Verantwortlichkeit des Gesamtsystems liegt im konkreten Fall gänzlich bei der Firma Kieback&Peter, die sowohl die Rolle des Eigentümers, Betreibers, Nutzers und Herstellers der verwendeten Gebäudeleittechnik abdeckt.

Zielsetzung und Methodik

Mit dem Demonstrationsgebäude von Kieback&Peter verfolgte das Fraunhofer ISE das Ziel, neu entwickelte Verfahren zur automatischen Fehlererkennung auf die Messdaten aus der Gebäudeautomation anzuwenden, um Fehler im Betrieb der Anlagen zu identifizieren und Korrekturmaßnahmen abzuleiten. Dabei hat das Fraunhofer ISE die Eignung von Qualitativen Modellen (QuaMo) für die Fehlererkennung in TGA-Anlagen untersucht. Für die Anwendung von selbstlernenden Verfahren zur automatischen Fehlererkennung wie QuaMo sind Messdaten in einer hohen zeitlichen Auflösung und über einen langen Zeitraum, die dem nominalen Betrieb einer Anlage abbilden, notwendig. Demnach soll auch für die Lernphase des Verfahrens weitgehend ein fehlerfreier Betrieb der Anlage sichergestellt werden, um zu vermeiden, dass Messdaten eines Fehlbetriebs im Trainingsdatensatz enthalten sind. Dies kann beispielweise durch die Anwendung vorgelagerter Verfahren wie eines regelbasierten Systems er-

reicht werden. Aufgrund der Komplexität dieses Ansatzes und von Qualitätsdefiziten in den Messdaten (fehlende Datenpunkte z.B. bei RLT-Anlagen, Datenlücken) wurde entschieden QuaMo lediglich auf ein einzelnes Subsystem - den Heizkreis des 4.OG - anzuwenden. Hierfür haben das Fraunhofer ISE und in Zusammenarbeit mit der Fa. Kieback&Peter die vom ISE entwickelten Bibliotheken für QuaMo auf einen Einplatinencomputer vom Typ Raspberry Pi integriert, im Labor getestet und anschliessend in einer Testumgebung der Fa. Kieback&Peter implementiert (siehe Abbildung 9.10-1). Für diese prototypische Implementierung von QuaMo war eine Verlängerung der Testphase bis Ende der Heizperiode 2017/2018 notwendig. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse aus dieser Untersuchung erst im Bericht zum APA5 beschrieben. Die Analyse des Betriebs der Anlagen im Kieback&Peter Gebäude beruhte demnach auf Basis von Regeln und auf der Analyse von Grafiken wie Zeitreihen-, Scatter- und Carpetplots. Außerdem hat das Fraunhofer ISE das thermische Raumklima in 6 Referenzräumen im Gebäude anhand der Verfahren der EN ISO 7730 und EN 15251 ausgewertet. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen dargestellt.

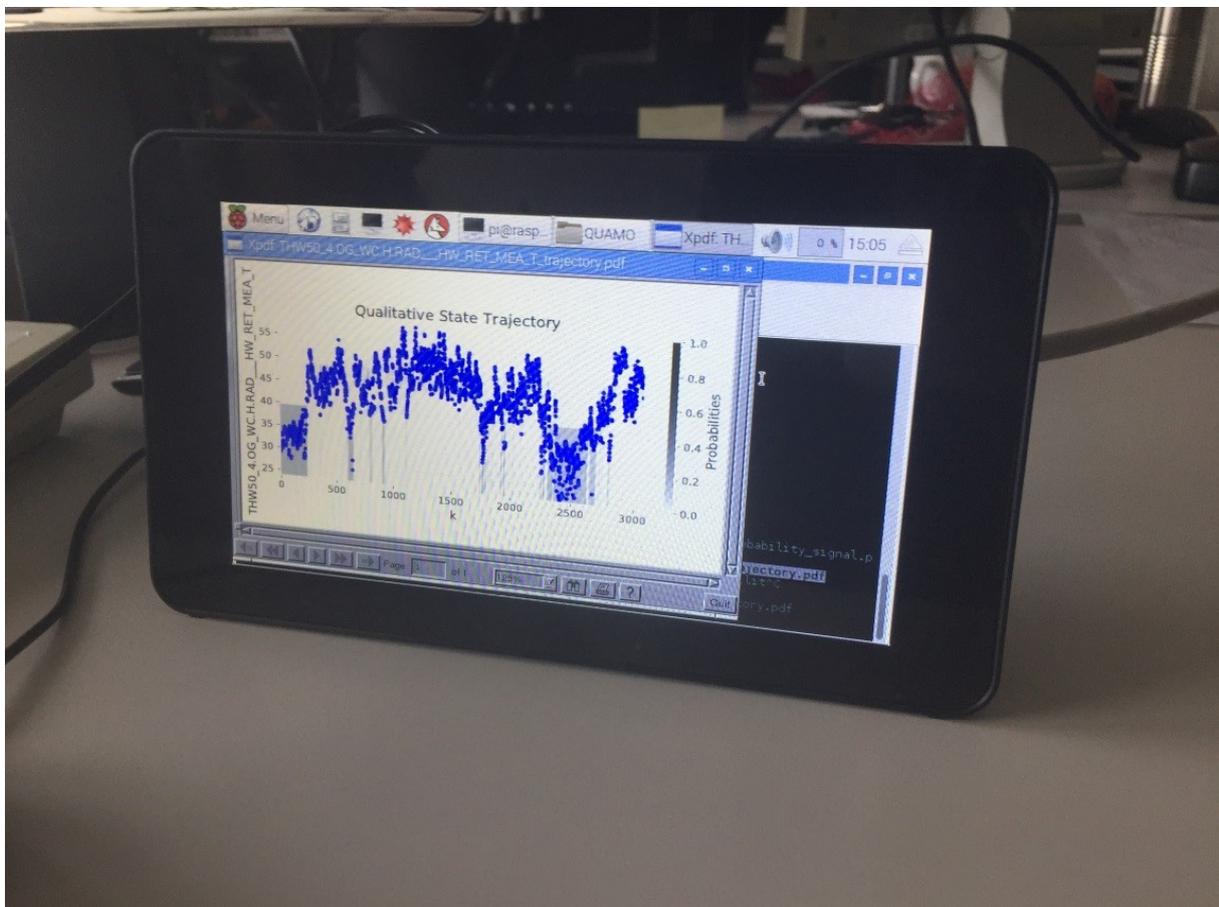


Abbildung 9.10-1: Implementierung der qualitativen Modelle auf einem RaspberryPi (im Bild dargestellt ist eine qualitative Zustandstrajektorie eines Heizungssystems) (@ Fraunhofer ISE)

9.10.1 Fehler (ISE)

Tabelle 9.10-1: Fehlerliste

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
1	Nachtabenkung: keine Verbrauchsreduzierung in der Nacht erkennbar, die Heizkurve ist/war so hoch eingestellt, dass die programmierte Absenkung der Heizkurve die Anlage immer noch voll versorgt.	Trenddaten	Sollwerte einstellen	teilw. behoben
2	Die Kesselpumpe läuft über mehrere Stunden obwohl Kessel nicht benötigt wird. Der Kessel wird im stand-by betrieben um ihn bei Bedarf schnell dazu schalten zu können.	Trenddaten - Analyse Anlagenbetrieb	Änderung Projektierung	gemeldet
3	Ausfall Gaskessel für ca. 1h (mehrmals an unterschiedlichen Tagen), verursacht durch Wartungen.	Trenddaten - Analyse Anlagenbetrieb	Handbetrieb zurücksetzen	behoben
4	Der Kesselsollwert ist unter dem Sollwert der Rücklaufanhebung, dadurch kommt es teilw. zu einem fehlerhaftem Betrieb.	Trenddaten / Dokumentation Projektierung / Regel	Anpassung Sollvorlauftemperatur	behoben
5	Der Kesselsollwert ist höher als der Einstellwert des Kesseltemperaturwächters.	Trenddaten	Temperaturwächter einstellen	behoben
6	Häufiges Schalten der Kessel, diese haben zwar jeweils nur 2 Leistungsstufen, könnten aber bei geänderter Regelstrategie längere Laufzeiten haben.	Trenddaten	Regelstrategie anpassen	gemeldet
7	Die Uhrzeit in der GLT/Datenbank stimmt nicht mit der tatsächlichen Uhrzeit überein. Die Auswirkung sind Zeitprogramme, die nicht zu realen Nutzungszeiten passen.	Trenddaten - Analyse Außentemperatur	Einstellen Uhrzeit, ggf. mit Zeitserver verbinden	behoben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
8	Der Grenzwert von 50 C der Rücklauftemperatur wird während einer signifikanten Anzahl an Betriebsstunden unterschritten. Die Regelung der Ventilen entspricht nicht den Vorgaben.	Regel	Regelungsparameter überprüfen	anstehend

9.10.2 Regelungseinstellungen, identifizierte Fehler, Korrekturmaßnahmen der gebäudetechnischen Anlagen (ISE)

9.10.2.1 Kesselanlage zur Wärmeerzeugung (ISE)

Funktion

Die folgende Beschreibung der Funktionen der Kesselanlage wurde dem K&P Dokument *Funktionsbeschreibung - Hauptgebäude Umbau Tweg* vom 08.05.2013 entnommen. Die beiden 2-stufigen Kessel werden durch die nachgeschalteten Verbraucher angefordert. Die Kesselrücklauftemperaturen jedes Kessels werden bei Betrieb der Kessel ständig auf einen einstellbaren Wert (50 °C Voreinstellung) überwacht. Bei unterschreiten dieses Wertes wird das Rücklaufventil stetig geöffnet. Der Wechsel zwischen Führung- und Folgekessel findet über die Aussentemperatur statt, bei Störung des Führungskessels wird bei Anforderung sofort auf den verbleibenden Kessel gewechselt. Kessel 1 ist im Sommerbetrieb über 11 °C Aussentemperatur der Führungskessel. Bei Aussentemperaturen kleiner 10 °C ist Kessel 2 der Führungskessel. Bei erhöhter Wärmeanforderung oder Störung des Führungskessels wird der Folgekessel dazugeschaltet. Der Sollwert der Kesselanlage ergibt sich aus den Sollwerten der Heizkreise oder Warmwasserbereitung zuzüglich einer einstellbaren Erhöhung von 5 Kelvin. D.h. der höchste Sollwert der Heizkreise oder der Sollwert für die Warmwasserbereitung wird als Sollwert für die Kesselregelung übernommen. Die Heizkurven der Heizkreise werden so eingestellt dass bei Aussentemperaturen von -20 °C eine Sollvorlauftemperatur von 90 °C vorgegeben wird. Bei Anforderung über die Warmwasserbereitung wird eine Mindestsollvorlauftemperatur von 62 °C vorgegeben. Bei Aussentemperaturen über 22 °C, wird die Warmwasserbereitung über eine Elektro-Heizpatrone betrieben. Jeder Kessel wird über seine eigene Vorlauftemperatur mit Maximalbegrenzung in seiner Leistung begrenzt. Die Gesamt-Vorlauftemperatur wird über die Stufen der Brenner geregelt. Bei einem Ansteuersignal (errechnet über den Regelkreis) von 15% geht der Führungskessel in Betrieb, bei erhöhtem Wärmebedarf und einen Ansteuersignal von 55% wird die zweite Stufe angefordert, nach einer Verzögerungszeit und einem Signal größer als 95% wird der Folgekessel in Stufe 1 zugeschaltet. Wenn die Leistung nicht ausreicht wird nach einer Verzögerung die zweite Stufe vom Folgekessel zugeschaltet. Unterschreitet das Signal einen Wert von 45% wird der Folgekessel abgewählt. Bei unterschreiten des Signals von wiederum 10% geht der Führungskessel ausser Betrieb, die Wiedereinschaltung erfolgt mit einer Hysterese von 5%. Die Stufen werden immer mit einer Mindestlaufzeit angefordert.

Identifizierte Fehler, Auswertungen, Korrekturmaßnahmen

- Der Grenzwert von 50°C für die minimale Rücklautemperatur zu den Kesseln wurde 2016 und 2017 während einer signifikanten Anzahl an Stunden unterschritten wie in den Abbildungen 9.10-2, 9.10-3 und 9.10-4 dargestellt. Diese Regel wurde implementiert unter Berücksichtigung der Signalen der Brennerstufen und der Betriebsrückmeldungen der Kesselpumpen. Somit kann sicher gestellt werden, dass die Kessel in Betrieb sind, wenn die Bedingung der Regel geprüft wird. Der Grenzwert von 50°C wird häufig nicht eingehalten, während die Stellsignale der Ventile auf eine nicht 100%ige Öffnung hindeuten. Bei dieser Kesselbauart kann diese Betriebsart zu einer Säurekondensatkorrosion in den Kesseln durch Taupunktunterschreitung führen und ihre Funktion und Lebensdauer beeinträchtigen. Eine Prüfung der Regelung und der Ventile wird empfohlen.

Kessel 1 - Ueberwachung Ruecklauftemperatur

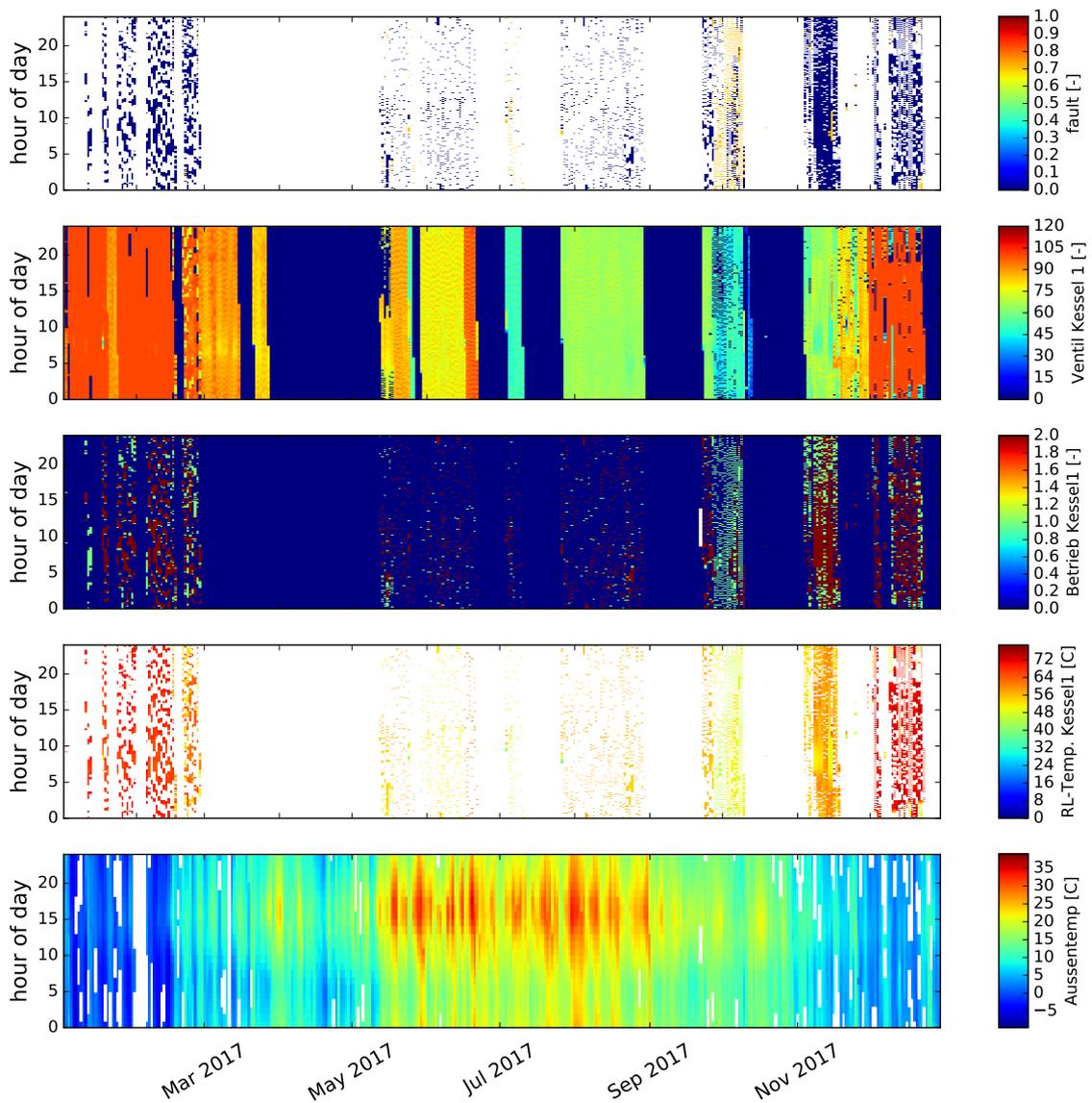


Abbildung 9.10-2: (Carpetplot - Minutenwerte - Kessel 1) Von unten nach oben: Aussenlufttemperatur, Rücklauftemperatur, Betriebssignal Kessel, Stellsignal Ventil, Fehlersignal (@ Fraunhofer ISE)

Kessel 2 - Ueberwachung Ruecklauftemperatur

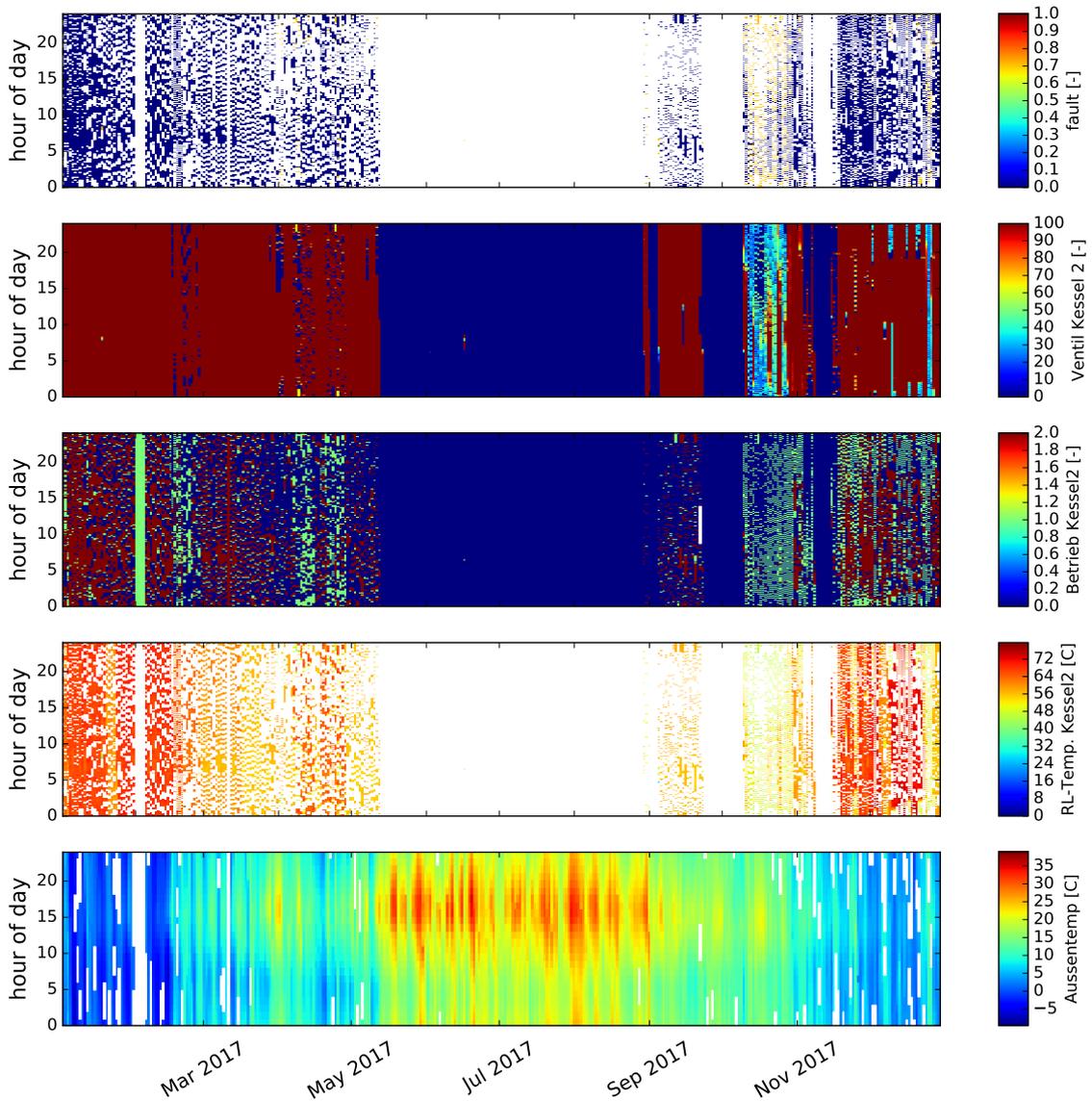


Abbildung 9.10-3: (Carpetplot - Minutenwerte - Kessel 2) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Rücklauftemperatur, Betriebssignal Kessel, Stellsignal Ventil, Fehlersignal (@ Fraunhofer ISE)

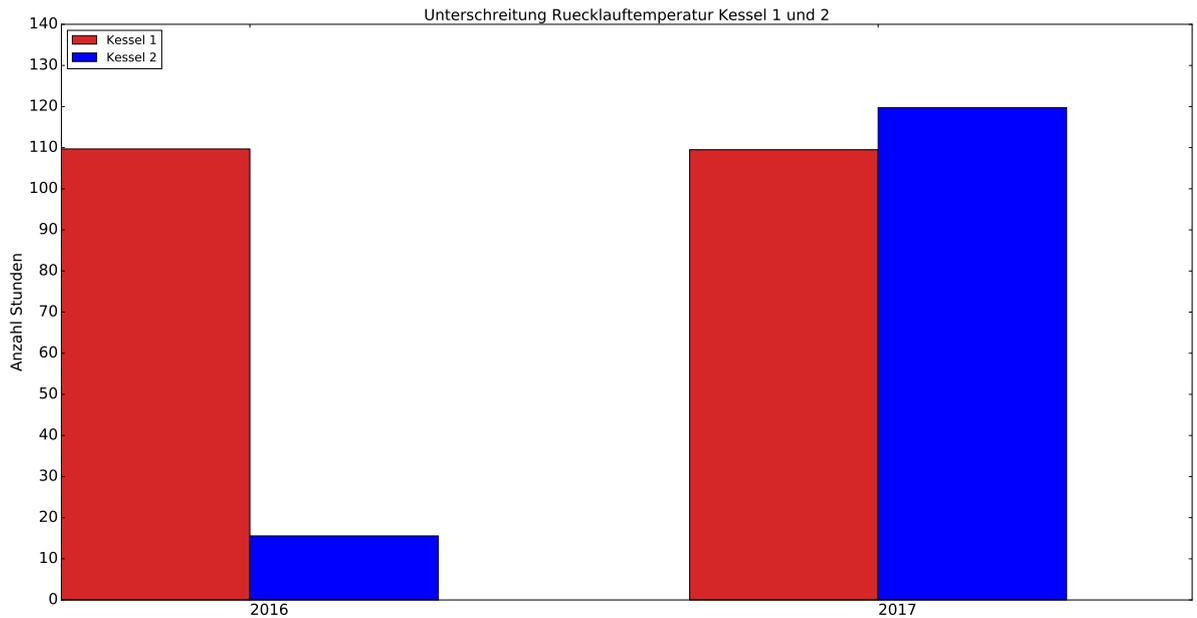


Abbildung 9.10-4: Anzahl der Stunden mit Unterschreitung der minimalen Kesselrücklauftemperatur für Kessel 1 und Kessel 2 (@ Fraunhofer ISE)

- Abbildung 9.10-5 zeigt die stündliche Schalthäufigkeit der Brennerstufen 1 und 2 beider Kessel. Ersichtlich ist, dass Kessel 1 im Sommer und Kessel 2 im Winter der Führungskessel ist. Diese Betriebsweise entspricht den Planungsvorgaben.
- Die Leistung der Brenner beider Kessel wird an den schwankenden Wärmebedarf des Gebäudes durch die Zu- und Abschaltung der Brennerstufen angepasst. Im Winter schalten die Brenner stündlich bis zu 10 Mal ein und aus (siehe Abbildung 9.10-5). 2017 war die Laufzeit und die Schalthäufigkeit beider Kessel aufgrund kälterer Außentemperaturen höher als 2016. Kessel 2 erreichte 2017 über 30.000 Einschaltvorgänge (siehe 9.10-6). Auch wenn die Mindestbrennerlaufzeiten die Herstellervorgaben nicht unterschreiten (empfohlene Laufzeiten zwischen 120 und 300 s) könnte diese Betriebsweise durch den Einbau eines Wärmespeichers reduziert werden und somit auch ein schadstoff- und verschleißärmeres Betreiben der Brenner erreicht werden.

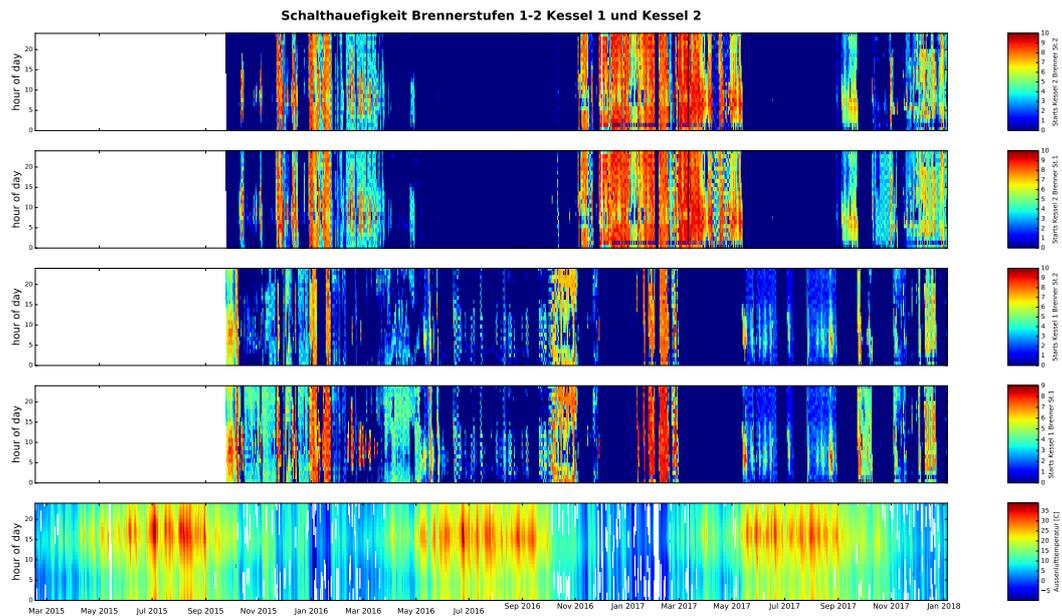


Abbildung 9.10-5: (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Anzahl Starts Kessel 1-Stufe 1, Anzahl Starts Kessel 1-Stufe 2, Anzahl Starts Kessel 2-Stufe 1, Anzahl Starts Kessel 2-Stufe 2 (@ Fraunhofer ISE)

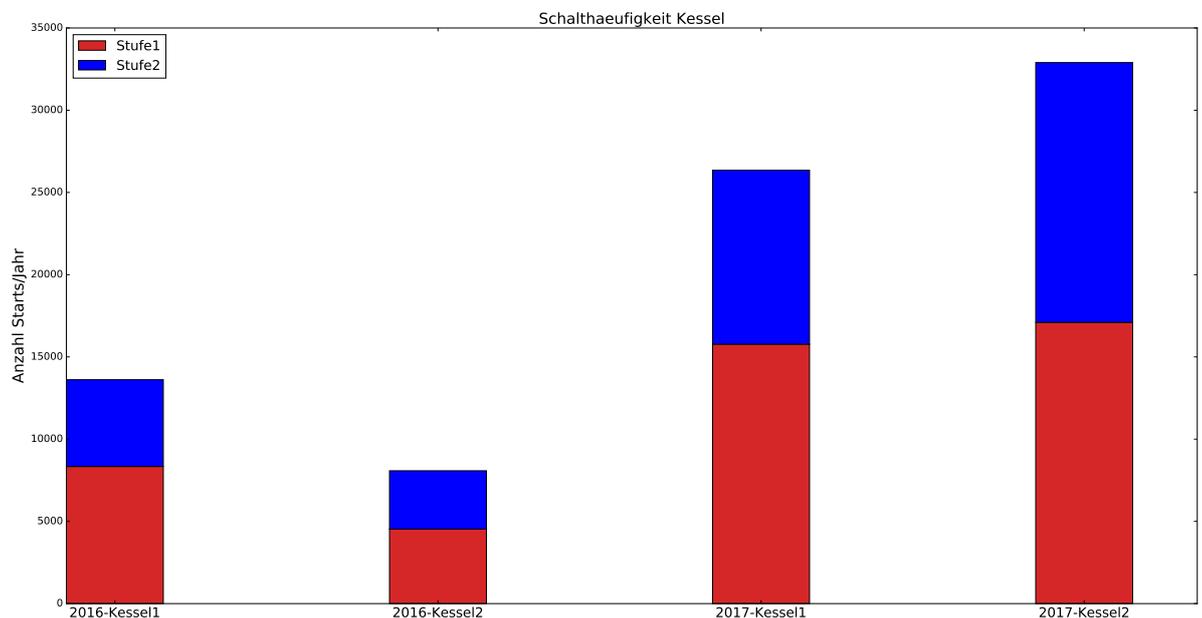


Abbildung 9.10-6: Schalthäufigkeit der Kessel 2016 und 2017 (@ Fraunhofer ISE)

- Abbildungen 9.10-7 und 9.10-8 zeigen die Betriebsrückmeldungen der Kesselbrennerstufen und der Kesselpumpen. Erkannt wird, dass die Nachlaufzeiten der Pumpen, vor allem beim Kessel 1, im Winter über längere Zeiträume über 60 min betragen. Dies könnte auf max. 30 min reduziert werden um den Stromverbrauch der Pumpen zu reduzieren.

Nachlaufzeit Kesselpumpe Kessel 1

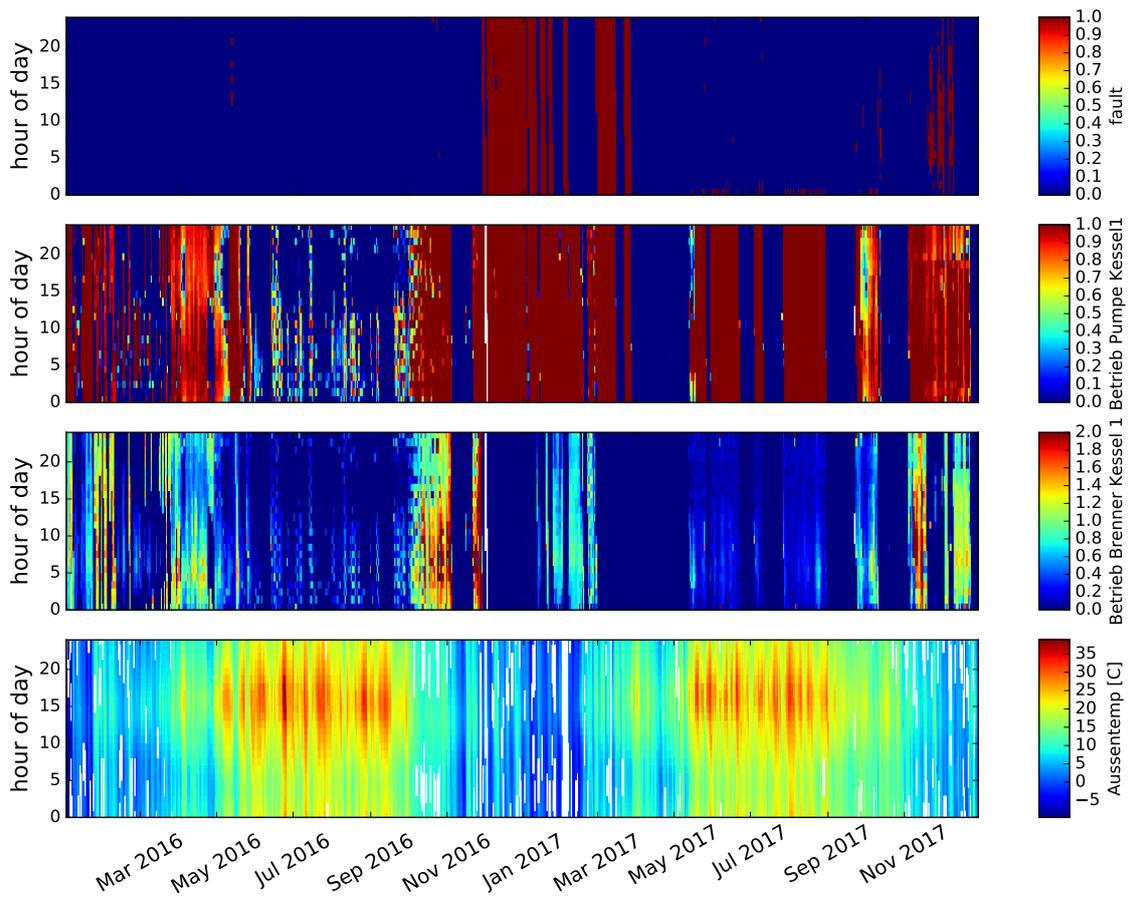


Abbildung 9.10-7: Synchronbetrieb und Nachlaufzeit der Pumpe Kessel 1 Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Betrieb Kesselbrenner 1-2, Betrieb Kesselpumpe, Fehlersignal (@ Fraunhofer ISE)

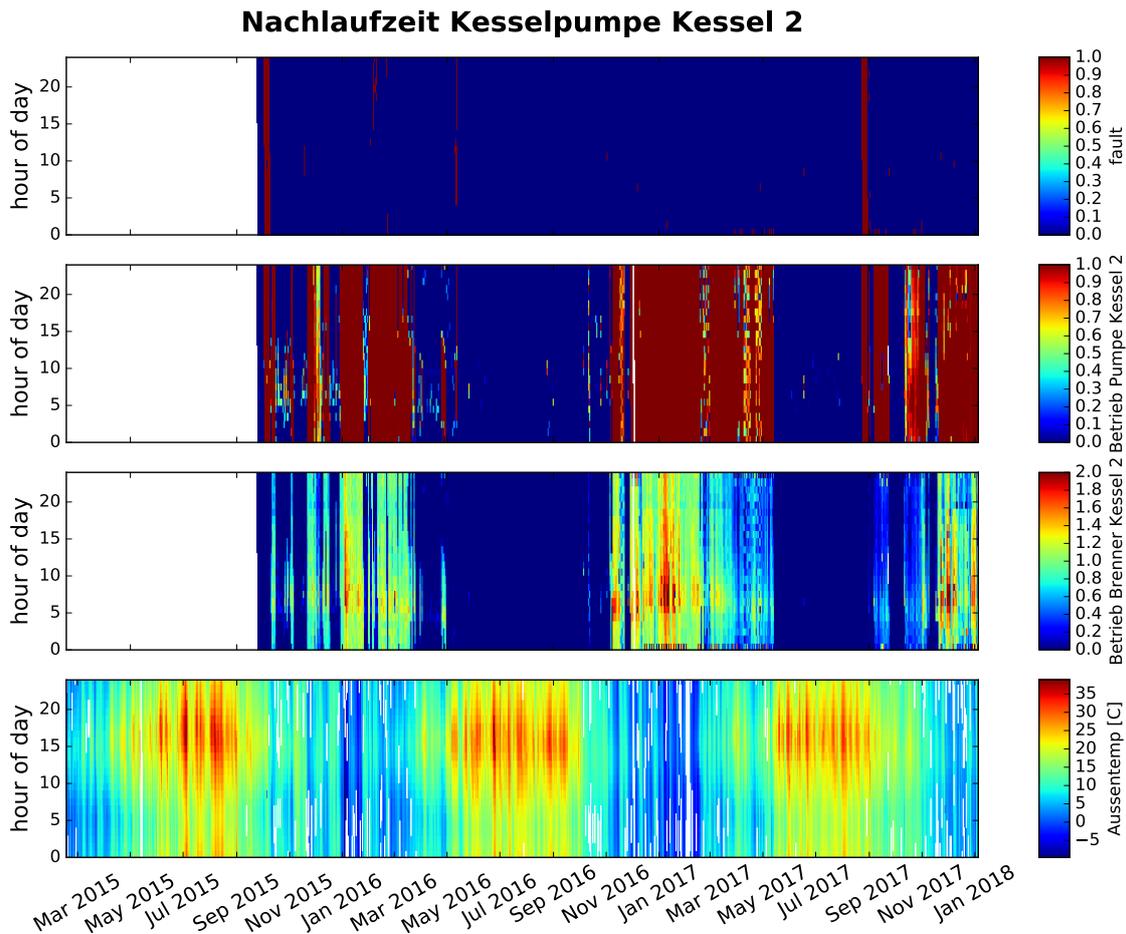


Abbildung 9.10-8: Synchronbetrieb und Nachlaufzeit der Pumpe Kessel 2 Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Betrieb Kesselbrenner 1-2, Betrieb Kesselpumpe, Fehlersignal (@ Fraunhofer ISE)

9.10.2.2 Heizkreise EG-6.OG (ISE)

Funktion

Die Wärmeübergabe in den Stockwerken EG bis 6.OG erfolgt durch Heizkörper, die für jedes Stockwerk über einen separaten Heizkreis versorgt werden. In der Betriebsart Automatik werden die Heizkreise bedarfsgerecht über die Außentemperatur mit der Stand-by Funktion ein- und ausgeschaltet. Die Betriebsart Tag/Nacht wird durch das Wochen- und Jahresprogramm festgelegt. Die Umschaltung zwischen Sommer- und Winterzeit erfolgt automatisch. Die Einschaltung der Umwälzpumpe erfolgt im Automatikbetrieb nach Bedarf durch die Anforderung des Heizungsregelkreises, bei Frostgefahr oder im Anlagenstillstand durch die Pumpenblockierschutz-Funktion. Entsprechend der eingestellten Heizkurve wird der Sollwert für die Vorlauftemperatur errechnet. Die Führung erfolgt nach der Außentemperatur. Entsprechend der Regelabweichung wird das Regelventil angesteuert, bis der errechnete Sollwert erreicht ist. Überschreitet die Außentemperatur die in dem Parameter Stand-by Tag oder Stand-by Nacht eingestellten Grenzwerte, so werden 1 Stunde nach Überschreitung der Grenzwerte folgende Schaltfunktionen ausgeführt: die Anlage geht in den Stand-by-Betrieb, das Ventil fährt zu und die Pumpe schaltet nach der eingestellten Nachlaufzeit aus.

Bilanzierung Heizkreise

Der Gesamtwärmeverbrauch wird über einen bestehenden Wärmemengezähler erfasst. Der Wärmeverbrauch der Heizkreise EG-6.OG im K&P Gebäude wird einzeln über Wärmemengenzähler mit Ultraschall-Durchflusssensoren der Fa. Aquametro gemessen. Eine M-Bus Schnittstelle bindet die entsprechenden Wärmerechnermodule an die GLT an. Die Nachrüstung der Wärmemengezähler fand im Rahmen von OBSERVE und mittels einer Zufinanzierung des Projekts statt. Die neuen Wärmemengezähler wurden im September 2016 in Betrieb genommen. Für die Heizkreise EG-6.OG liegen Messdaten zwischen diesem Zeitpunkt und Dezember 2017 vor.

2016 lag der unbereinigte Gesamtwärmeverbrauch bei 549225 kWh und 2017 bei 536923 kWh. Dies entspricht einem spezifischen Wärmeverbrauch von 148 bzw. 144 kWh/m².a (siehe Abbildung 9.10-9). Nach Wetterbereinigung ergibt sich eine Absenkung des Wärmeverbrauchs von ca. 5% zwischen den beiden Jahren (siehe Abbildung 9.10-10). Inwiefern diese Verbesserung in unmittelbarem Zusammenhang mit den Verbesserungsmaßnahmen hängen, die während dem Projekt OBSERVE im Laufe von 2016 durchgeführt worden sind, kann hier noch nicht beurteilt werden. Die Verteilung des Wärmeverbrauchs zwischen den Stockwerken ist in Abbildung 9.10-11 dargestellt. Ersichtlich ist, dass über 33% der Wärme im Erdgeschoss verbraucht wird, obwohl dieses eine ähnliche Fläche wie EG1-EG5 aufweist. Dies liegt höchstwahrscheinlich an den bauphysikalischen Gegebenheiten (Parkplatz im 1.UG, niedrigere Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung) als auch an der Nutzung als Eingangsbereich und Foyer (Verluste durch Türöffnungen). Außer dem kleineren 6.OG weisen die anderen Stockwerke einen ähnlichen Anteil auf wobei der Verbrauch im 3.OG etwas niedriger ist.

Frage an KuP: ist die Parkplatzdecke thermisch gedämmt

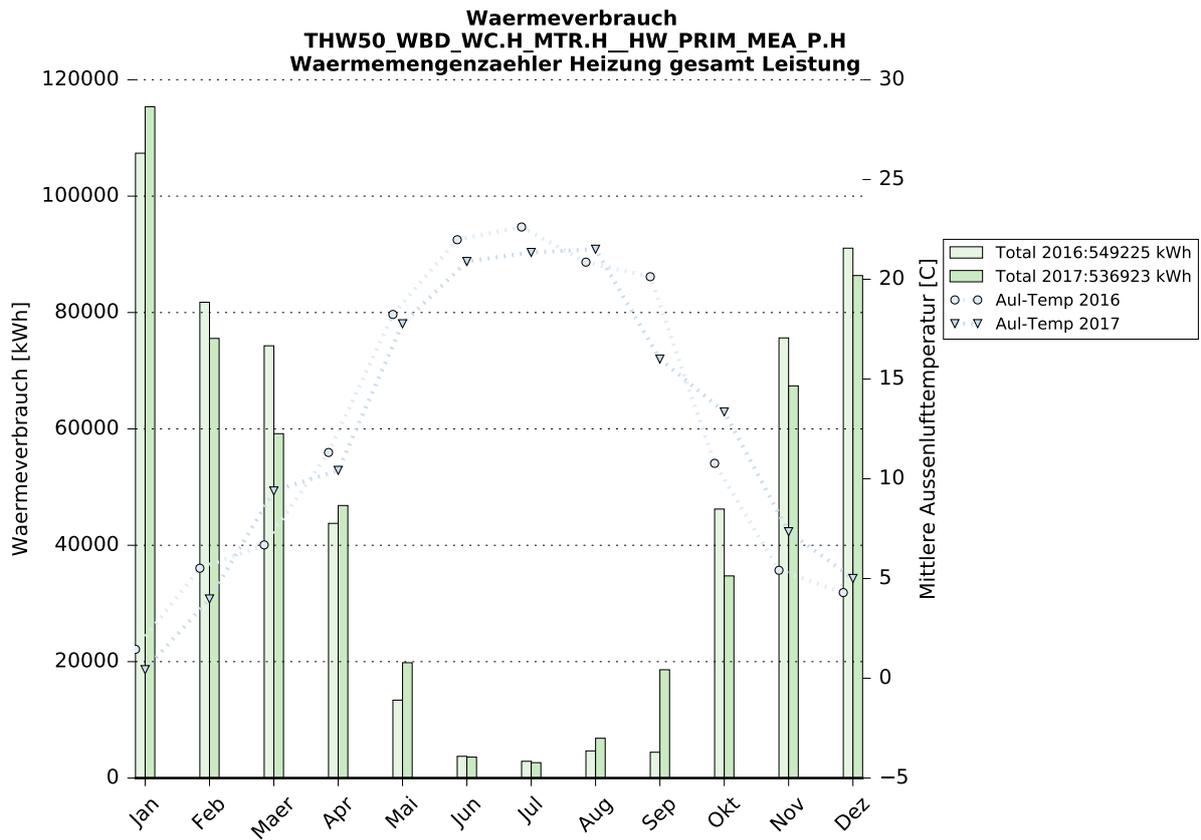


Abbildung 9.10-9: Gesamtwärmeverbrauch 2016/2017 (@ Fraunhofer ISE)

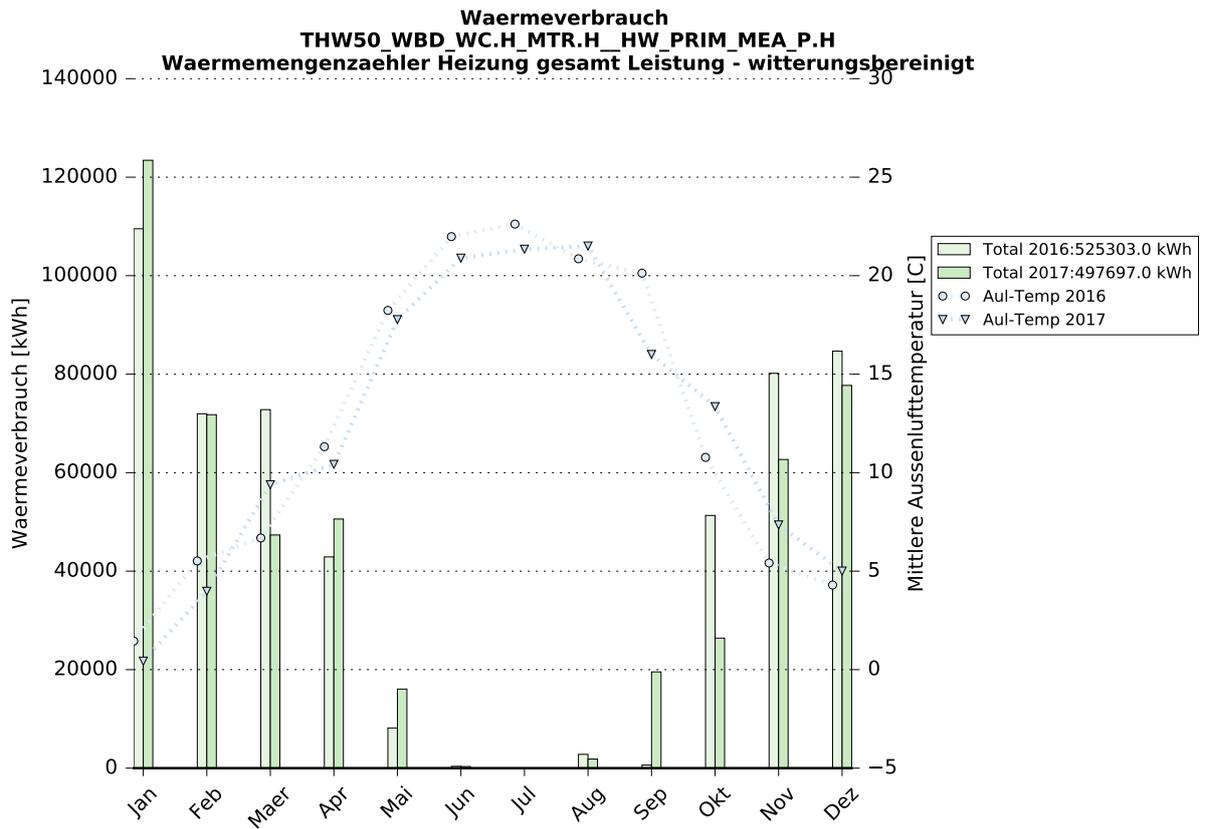


Abbildung 9.10-10: Gesamtwärmeverbrauch wetterbereinigt 2016/2017 (@ Fraunhofer ISE)

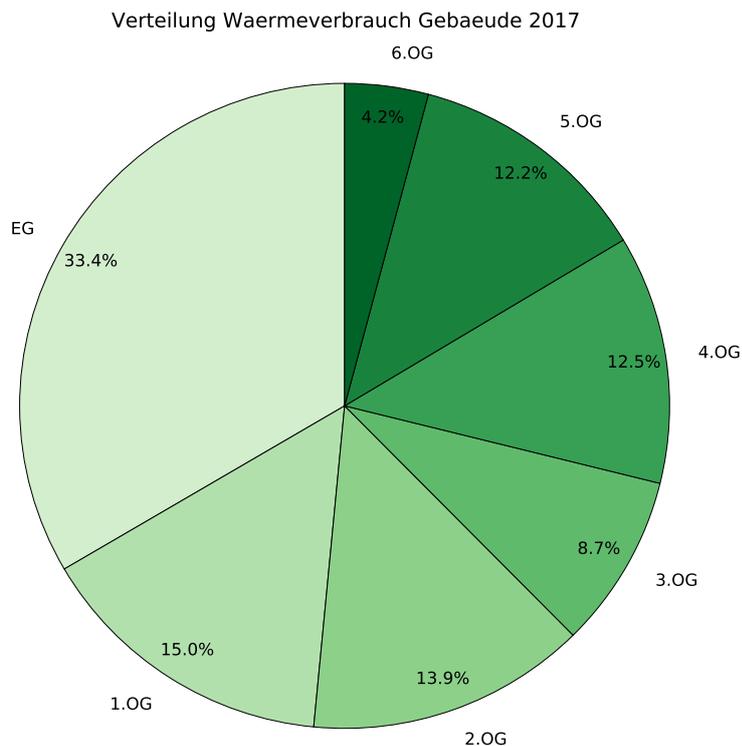


Abbildung 9.10-11: Verteilung des Wärmeverbrauchs 2017 pro Geschoss (@ Fraunhofer ISE)

Betrieb Heizkreise

- Die 6 Heizkreise zeigen ein ähnliches Verhalten. Exemplarisch wird der Heizkreis des 3.OG für die Darstellung der Ergebnisse aus der Fehleranalyse gewählt.
- Anhand von Abbildung 9.10-12 ist ersichtlich, dass die Heizkreise ohne Wochenendabsenkung betrieben werden.
- Abbildung 9.10-13 zeigt, dass alle Heizkreispumpen während der Heizperiode kontinuierlich laufen. Im Sommer ist die Pumpe nur kurzzeitig morgens im Betrieb. Anhand einer vorderfinierten Regel wurde erkannt, dass die Grenztemperatur für das Ausschalten der Pumpen während des Monitoringzeitraums bei 23 °C lag. Dieser Grenzwert sollte auf einen Wert von maximal 18 °C herabgesenkt werden, um einen unnötigen Betrieb des Heizkreises bei hohen Außenlufttemperaturen zu vermeiden.
- Folglich wird der Heizkreis bei höheren Temperaturen und geringem Heizbedarf über längere Zeiträume mit einer sehr niedrigen Temperaturspreizung von weniger als 0.5 K betrieben. Dies führt zu einer unnötigen Beanspruchung der gesamten Heizungsanlage und zu einem erhöhten Hilfsenergieverbrauch der Pumpe. Diese energetisch ungünstige Betriebsweise wurde über eine vordefinierte Regel identifiziert. Die Ergebnisse der automatischen Auswertung aus dem regelbasierten System zur Fehlererkennung des Fraunhofer ISE sind beispielhaft in der Abbildung 9.10-14 und in 9.10-15 dargestellt.

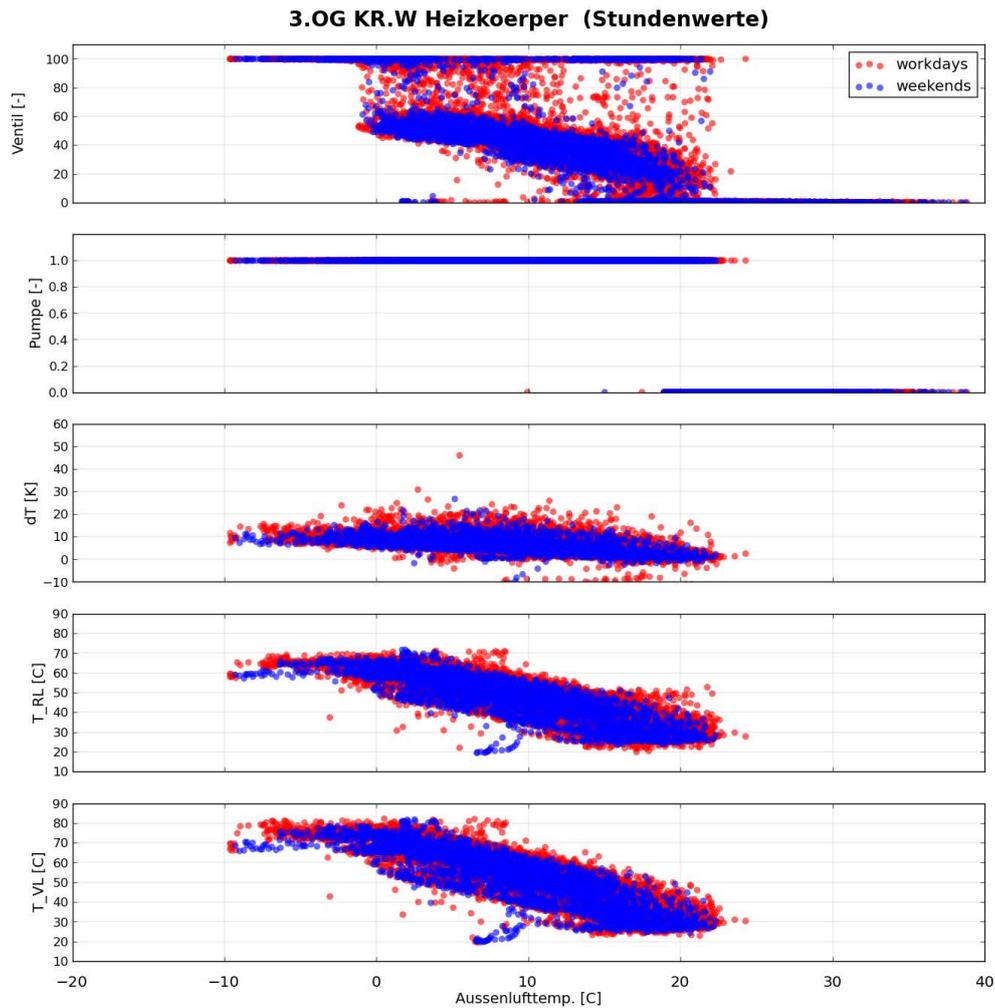


Abbildung 9.10-12: (Scatterplot) Von unten nach oben: Vorlauftemperatur ($T_{VL} [^{\circ}C]$), Rücklauftemperatur ($T_{RL} [^{\circ}C]$), Temperaturspreizung ($dT [K]$), Betriebsrückmeldung ($Pumpe [-]$), Stellsignal ($Ventil [-]$) (@ Fraunhofer ISE)

3.OG KR.W Heizkoerper (Stundenwerte)

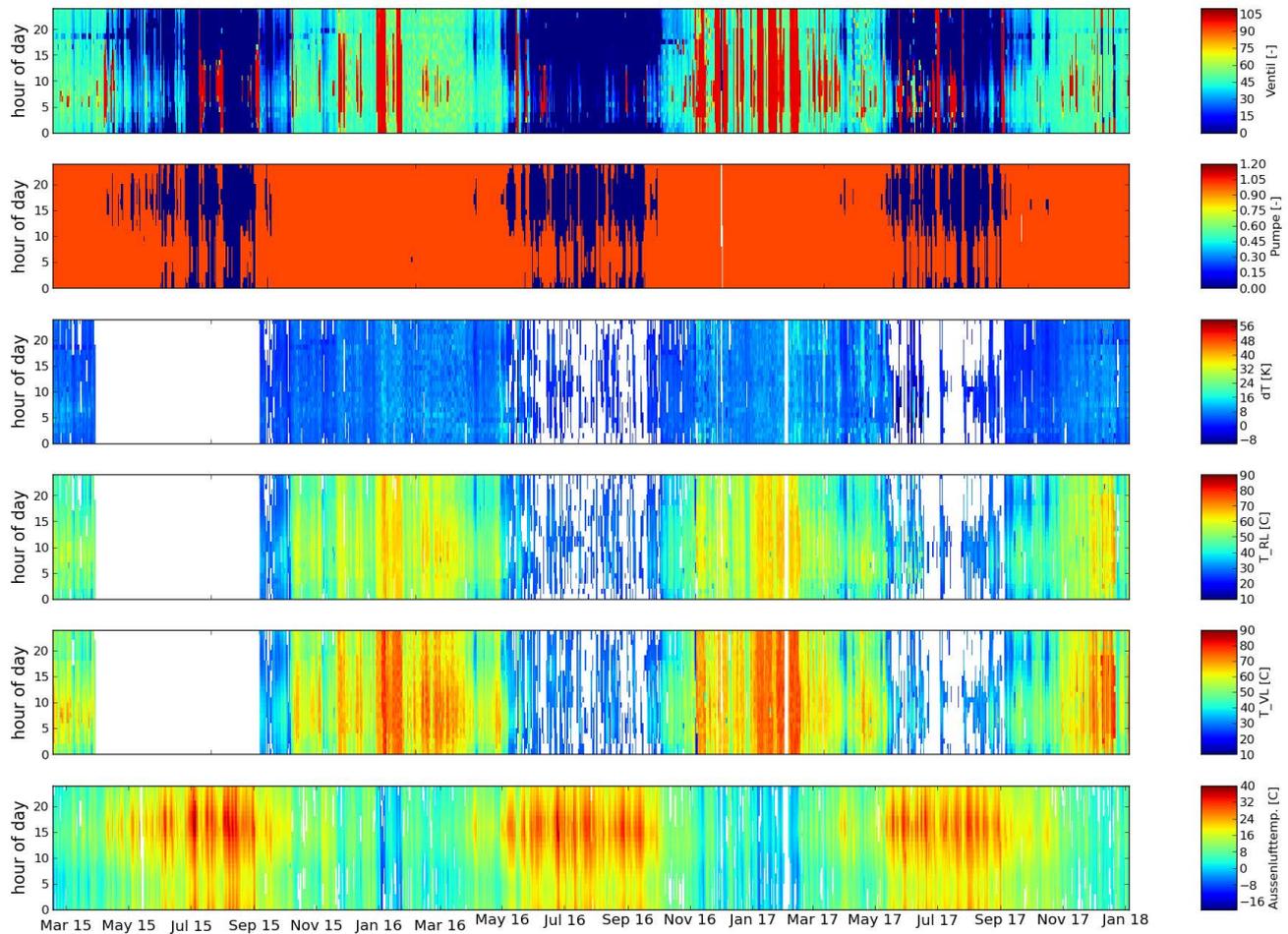


Abbildung 9.10-13: (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur ($[C]$), Vorlauftemperatur (T_{VL} [$^{\circ}C$]), Rücklauftemperatur (T_{RL} [$^{\circ}C$]), Temperaturspreizung (dT [K]), Betriebsrückmeldung Pumpe ($[-]$), Stellsignal Ventil ($[-]$) (@ Fraunhofer ISE)

Fault Detection Results for Building THW50

Analyzed zones
 Zones with found faults
 Number of zones with found faults / total analyzed
 Systems
 Systems with found faults
 Number of systems with found faults / total analyzed
 Routines with results
 Number of routines with results

3
3
1 / 1
THW50_3.OG.WC.H.RAD
THW50_3.OG.WC.H.RAD
1 / 1
.WoRule4 , WoRule5 , WoRule8
4

Detailed Building Statistics

	system	routines	count	fault_description	failure_code	diagnoses	config	sensors	first_start	last_end	duration_mean	duration_min	duration_median	duration_max
0	THW50_3.OG.WC.H.RAD	{uWoRule6}	11	Water loop operating with temperature spread lower than 0.5 K.	0x100	{}	{u'valve_threshold': 10.0, u'sig_threshold': 0.0, u'temp_spread': 0.5}	[THW50_3.OG.WC.H.RAD__HW_SUP_MEA_T, THW50_3.OG.WC.H.RAD_SHV__HW__SEV_CTRLSIG, THW50_3.OG.WC.H.RAD_PU__HW__SIG_STAT, THW50_3.OG.WC.H.MTR.H.HW_RET_MEA_T]	2018-11-05 13:22:00	2017-10-14 14:32:00	0 days 04:13:00	0 days 01:01:00	0 days 02:28:00	0 days 14:37:00
1	THW50_3.OG.WC.H.RAD	{}	5	leaking valve (valve closed, pump off but still volume flow)	0x8	{}	{u'ph_threshold': 0.0, u'vp_threshold': 0.0, u'sig_threshold': 0.0}	[THW50_3.OG.WC.H.MTR.H.HW_MEA_P_H, THW50_3.OG.WC.H.RAD_SHV__HW__SEV_CTRLSIG, THW50_3.OG.WC.H.MTR.H.HW_MEA_V_P, THW50_3.OG.WC.H.RAD_PU__HW__SIG_STAT]	2017-03-28 15:59:00	2017-10-16 19:04:00	0 days 01:57:12	0 days 01:21:00	0 days 01:41:00	0 days 02:56:00

Abbildung 9.10-14: Zusammenfassung von Ergebnissen aus der automatisierten Auswertung des Heizkreises 3.OG von links nach rechts: Häufigkeitsverteilung des Fehlers im Tagesverlauf, Verteilung der Fehlerlänge, Verteilung der Messungen und Signale des Regels: Pumpensignal, Ventilöffnung, Vor- und Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

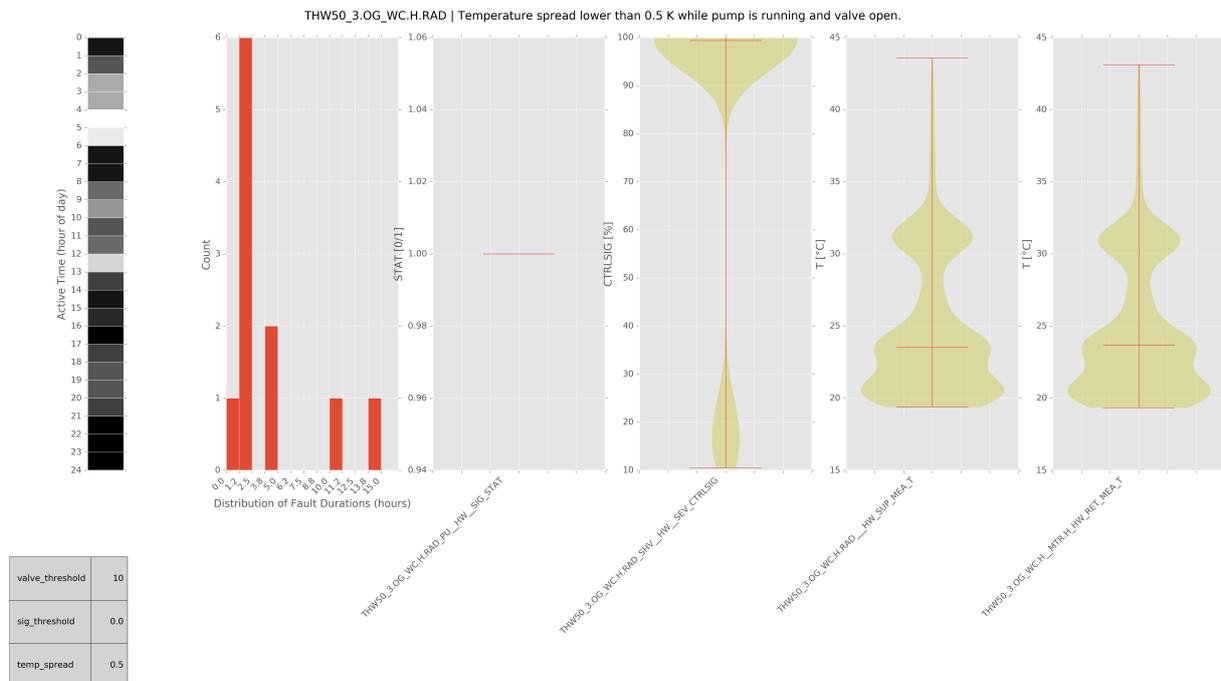


Abbildung 9.10-15: Visualisierung der Ergebnisse des erkannten Fehlers für den Heizkreis 3.OG (@ Fraunhofer ISE)

9.10.2.3 Bewertung des thermischen Raumklimas

Methodik

Für die Heizperiode 2016/2017 und die Kühlperiode 2017 hat das Fraunhofer ISE den thermischen Komfort im Kieback&Peter Gebäude nach den Normen EN ISO 7730 und EN 15251 ausgewertet. Diese Normen beschreiben ein Verfahren für die analytische Bestimmung und die Interpretation der thermischen Behaglichkeit und für die Berechnung des PMV und des PPD- Indexes. Mit der Anwendung der normierten Verfahren

können die Beheizung und die Kühlung des Innenraums objektiv ausgewertet werden und somit die Arbeitsbedingungen des Personals beurteilt werden. Hierzu wurden verfügbare Messdaten der Raumtemperaturen aus jeweils einem Referenzraum pro Stockwerk verwendet (siehe Tabelle 9.10-2). Es wurden keine spezielle Messtechnik für die Messung eingesetzt sondern Messdaten aus den Temperatursensoren der Gebäudeautomation benutzt.

Frage an K&P: sollen die Räume anonymisiert werden? bspw. nur mit Angabe des Stockwerks?

Tabelle 9.10-2: Räume mit Temperaturmessungen

Bezeichnung	Geschoss	Orientierung
R.10	EG	NW
R.04	1.OG	SO
R.27	2.OG	NO
R.22	3.OG	NO
R.23	4.OG	NO
R.16	5.OG	NO

Entsprechend der Empfehlungen der Norm EN 15251 wurden Raumtemperatursollwerte von 21 °C für die Heizperiode und von 25.5 °C für die Kühlperiode berücksichtigt. Für die Kategorisierung des Innenraumklimas wurden drei Mindestwerte der Innenraumtemperatur mit entsprechenden PMV/PPD Indizes für die Kühlperiode und drei Höchstwerte für die Heizperiode definiert. Der PMV/PPD-Index beschreibt die thermische Empfindung von „zu Heiß“ bis „zu kalt“ für den Körper als Ganzes. Diese Werte und Indizes werden in der Tabelle 9.10-3 und Tabelle 9.10-4 zusammengefasst. Werte die außerhalb der Grenze der Kategorie III fallen werden in Kategorie IV klassifiziert.

Tabelle 9.10-3: Kategorien des Innenraumklimas und PPD/PMV Indizes für die Heizperiode nach EN ISO 7730/EN 15251

Gebäudetyp	Kategorie	Mindestwert für Heizperiode in °C	PPD	PMV
Bürogebäude	I	21.0	< 6	$-0.2 < PMV < +0.2$
	II	20.0	< 10	$-0.5 < PMV < +0.5$
	III	19.0	< 15	$-0.7 < PMV < +0.7$

Tabelle 9.10-4: Kategorien des Innenraumklimas und PPD/PMV Indizes für die Kühlperiode nach EN ISO 7730/EN 15251

Gebäudetyp	Kategorie	Mindestwert für Kühlperiode in °C	PPD	PMV
Bürogebäude	I	25.5	< 6	$-0.2 < PMV < +0.2$
	II	26.0	< 10	$-0.5 < PMV < +0.5$
	III	27.0	< 15	$-0.7 < PMV < +0.7$

Auswertung Winter

Abbildung 9.10-16 zeigt den Prozent der Nutzungszeiten in den verschiedenen Kategorien für die analysierten Räume während der Heizperiode 2016-2017. Ersichtlich ist, dass der thermische Komfort in den Räumen im 4. und 5.OG gut war. Während über 95% der Belegungszeit fiel er mindestens in Kategorie II. In den anderen Räumen wurde Kategorie II seltener eingehalten - zwischen ca. 60% und 80% der Zeit. Die Grenzen der Kategorie III wurden zwischen 13% und 6% der Zeit überschritten. Vor allem im Referenzraum des 2.OG sind lange Nutzungszeiten in Kategorie III und IV zu verzeichnen.

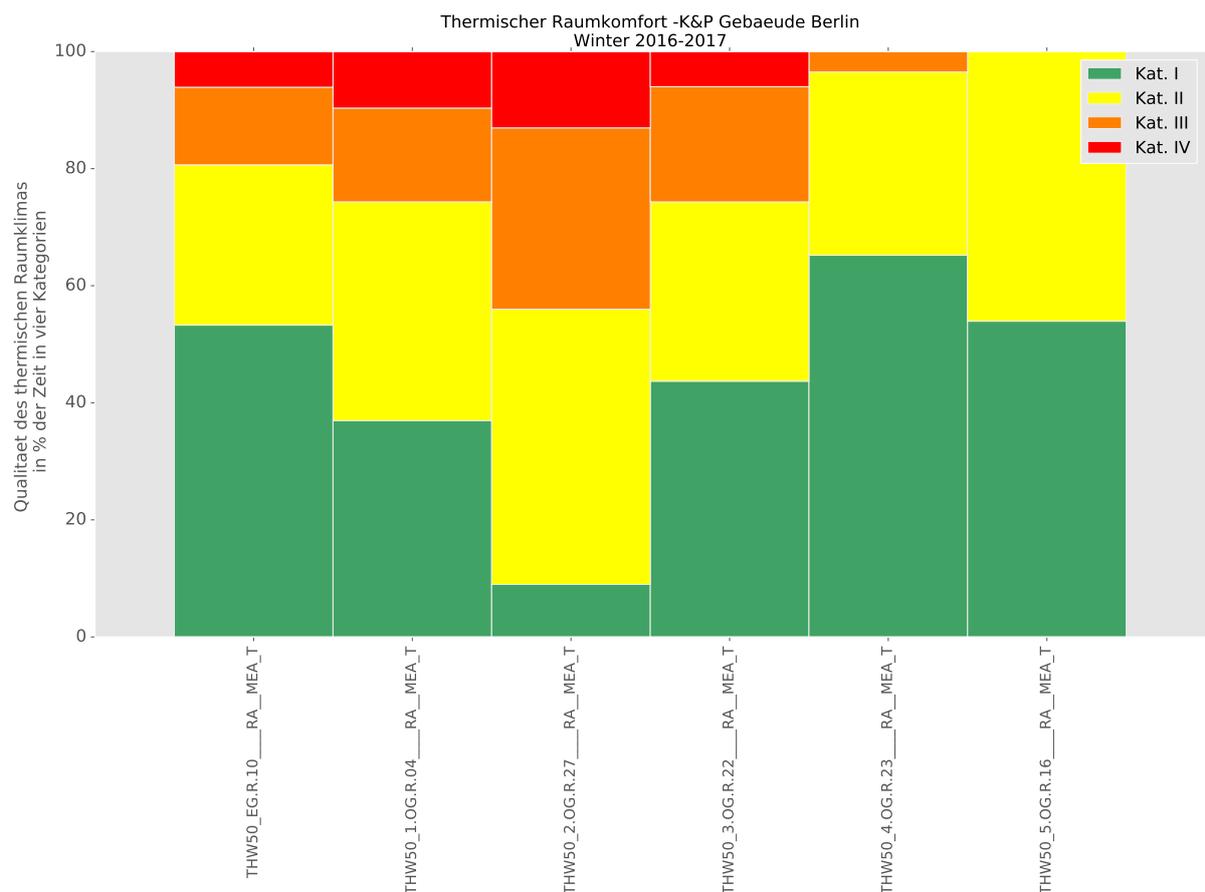


Abbildung 9.10-16: Winter 2016/2017 - Prozentsatz der Nutzungszeiten in Kat. I (hellgrün), Kat. II (dunkelgrün), Kat. III (orange) und außerhalb des Bereichs (rot) während der Belegungs- bzw. Nutzungszeit (@ Fraunhofer ISE)

Abbildungen 9.10-17 und 9.10-18 zeigen, dass die Komfortverletzungen in den Räum-

en im 1. und 2.OG, vor allem durch Überschreitung der oberen Grenzen der Kategorien II und III bei Außenlufttemperaturen zwischen 5 und 15°C verursacht wurden. Dies ist auch der Fall in den Räumen der anderen Geschosse, deren Auswertungen hier nicht dargestellt werden. Es wird empfohlen das Nutzerverhalten hinsichtlich der Bedienung der Heizung und des Sonnenschutzes zu überprüfen, die internen Lasten zu verringern (Geräte, Beleuchtung,...) und das Nutzerverhalten durch Empfehlungen positiv zu beeinflussen. Durch die Senkung der Heizkurve (Parallelverschiebung) und die Erhöhung ihrer Steilheit sowie durch die Sperrung der Heizkreise bei niedrigen Temperaturspreizungen können erhöhte Raumtemperaturen in der Übergangszeit reduziert werden.

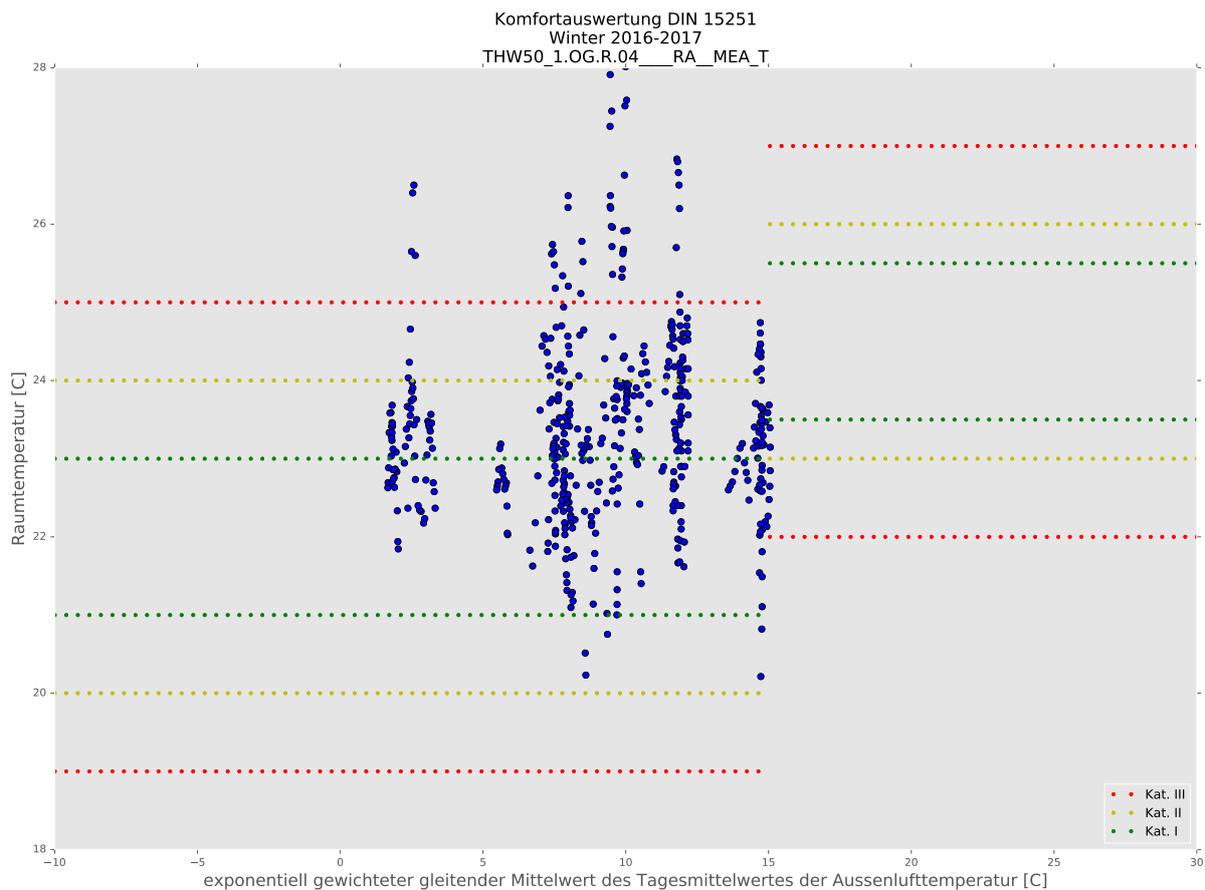


Abbildung 9.10-17: Winter 2016/2017 - Raum 04 1.OG - Raumtemperatur und Grenzen der Kategorien I,II und III (@ Fraunhofer ISE)

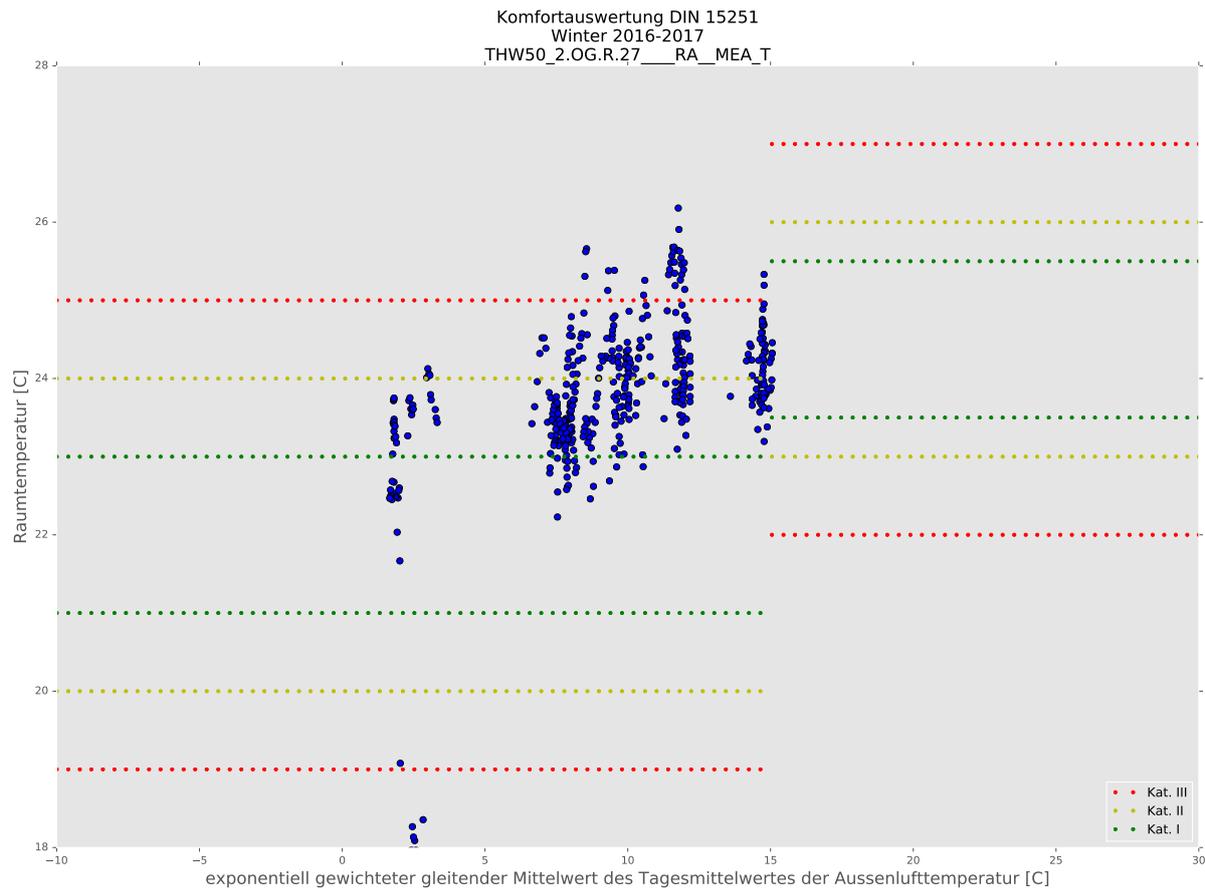


Abbildung 9.10-18: Winter 2016/2017 - Raum 27 2.OG - - Raumtemperatur und Grenzen der Kategorien I,II und III (@ Fraunhofer ISE)

Auswertung Sommer

Ähnlich wie für die Bewertung der Heizperiode zeigt Abbildung 9.10-19 den Prozent der Nutzungszeiten in den verschiedenen Kategorien für die analysierten Räume während der Kühlperiode 2017. Ersichtlich ist, dass die Räumen im 1. und 4.OG einen akzeptablen thermischen Komfort aufweisen. Während über 80% der Belegungszeit fiel er mindestens in Kategorie II. In den anderen Räumen im EG, 2.OG, 3.OG und 5.OG wurde Kategorie II seltener eingehalten - nur zwischen ca. 58% und 65% der Zeit. Überschreitungen der Kategoriegrenzen sind für den schlechten thermischen Sommerkomfort verantwortlich wie Abbildungen 9.10-20 und 9.10-21 zeigen. Es wird empfohlen zu prüfen, ob die Grenztemperatur für die Freischaltung der Heizkreise herabgesenkt werden kann, um den Heizbetrieb während warmen Tagen zu reduzieren. Weiterhin wird empfohlen, die Nutzer auf eine bessere Bedienung des Sonnenschutzes vor allem in den frühen Morgenstunden bei Nordost orientierten Räumen zu sensibilisieren.

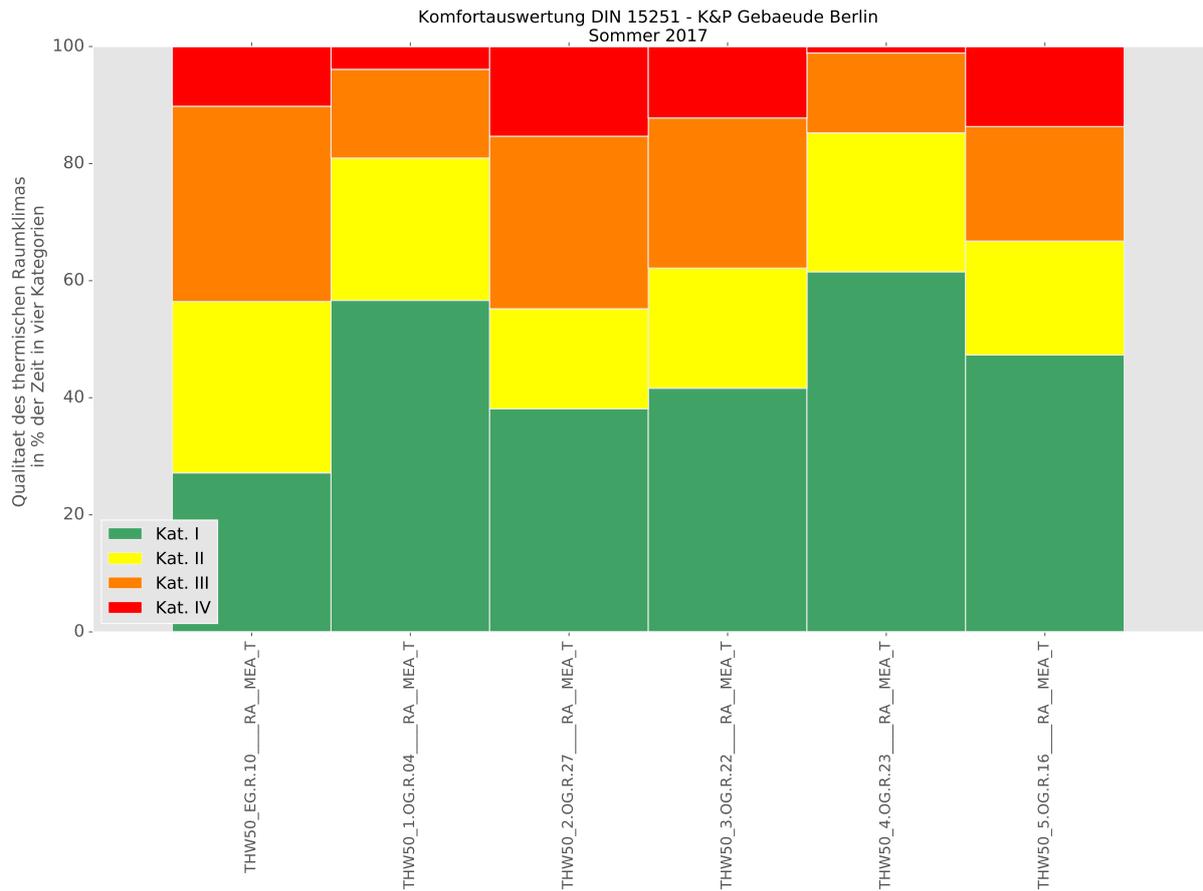


Abbildung 9.10-19: Sommer 2017 - Prozentsatz der Nutzungszeiten in Kat. I (hellgrün), Kat. II (dunkelgrün), Kat. III (orange) und außerhalb des Bereichs (rot) während der Belegungs- bzw. Nutzungszeit (@ Fraunhofer ISE)

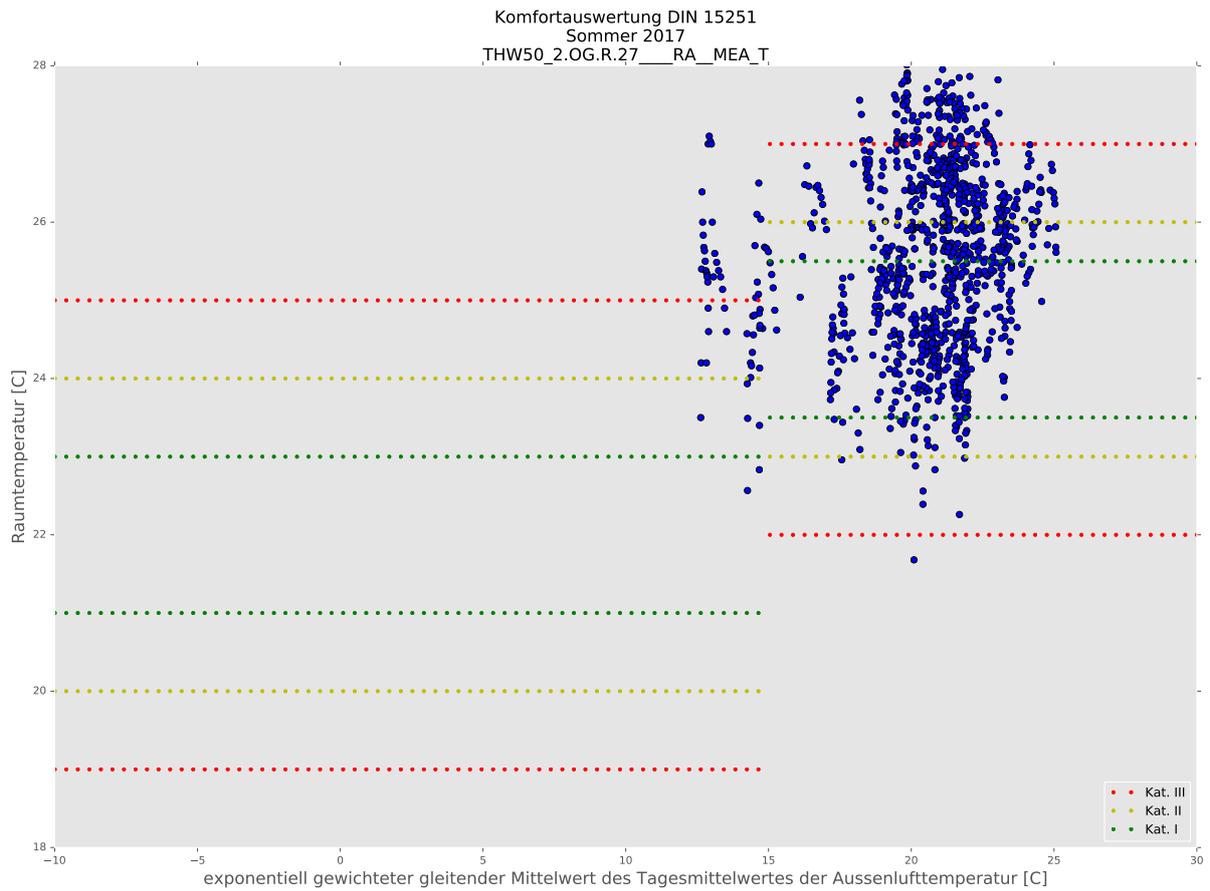


Abbildung 9.10-20: Sommer 2017 - Raum 27 2.OG - - Raumtemperatur und Grenzen der Kategorien I,II und III (@ Fraunhofer ISE)

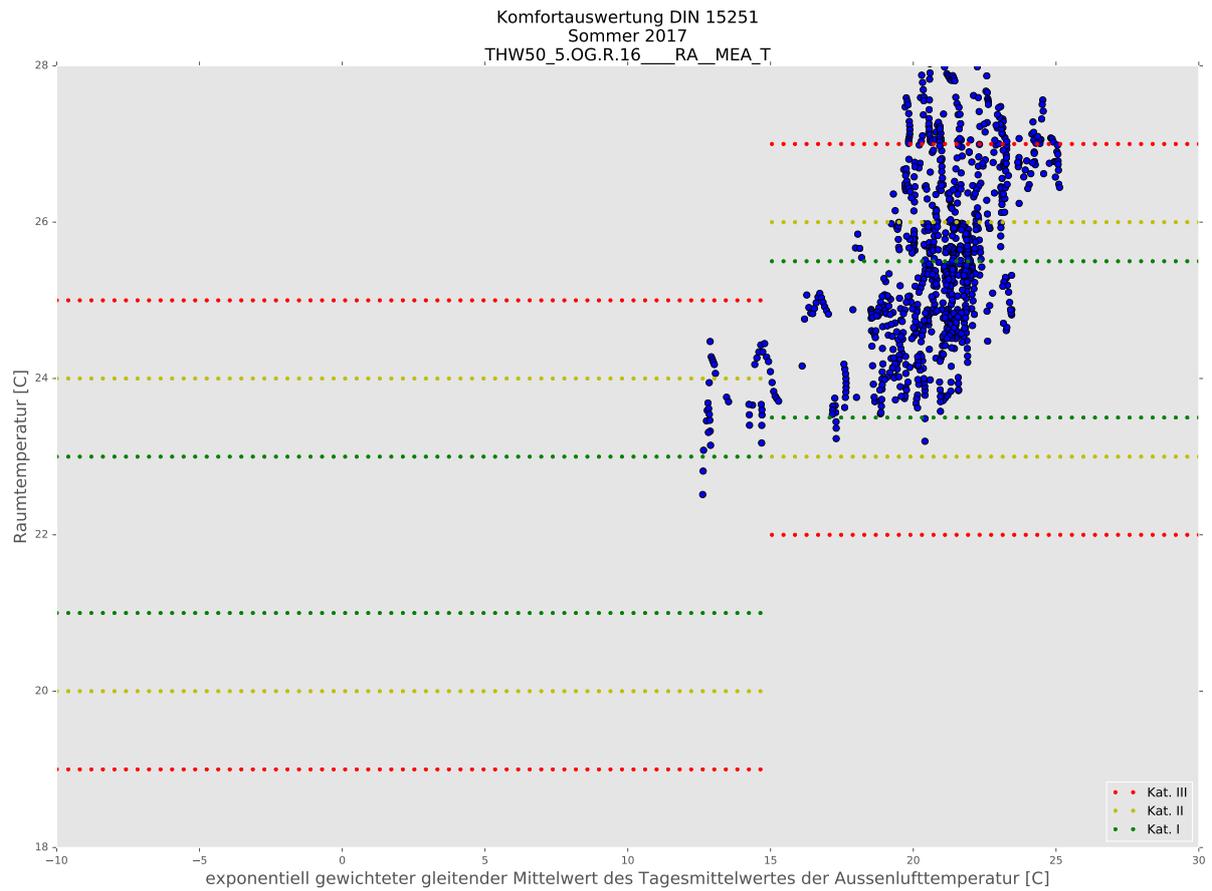


Abbildung 9.10-21: Sommer 2017 - Raum 16 5.OG - - Raumtemperatur und Grenzen der Kategorien I,II und III (@ Fraunhofer ISE)

9.11 DKB Zentrale Berlin (ISE)

Das Gebäude der Deutschen Kreditbank AG in der Taubenstraße 7-9 im Stadtteil Berlin-Mitte ist ein Büro- und Geschäftshaus mit einer Nettogrundfläche von 12.370 m². Die im Jahr 2005 sanierte Immobilie verbindet dabei Neubau und Bestand. Hinter einer Natursteinfassade wurde das Bestandgebäude technisch neu erschlossen und nach Süden durch einen T-förmigen Neubau mit einem glasüberdachten Innenhof ergänzt. Eine Verschattung besteht teilweise auf der Süd- und Westfassade. Die Hauptnutzung des Gebäudes ist als Bürogebäude mit Nutzungszeiten von Mo-Fr 8..20h. Samstags wird das Gebäude nur selten genutzt und Sonntag ist es i.d.R. geschlossen. Außer Personen befinden sich im Gebäude überwiegend elektrische Lasten, zu denen auch zwei Serverräume gehören.

Wärme-, Kälte- und Belüftungskonzept

Wärmeseitig wird das DKB-Gebäude mit Hilfe einer Fernwärmeübergabestation mit einer Anschlussleistung von 500 kW versorgt. Zu den einzelnen Verbrauchern gehören statische Heizkreise mit Heizkörpern, Heiz-/Kühldecken, RLT-Anlagen und eine unterstützende Fußbodentemperierung im Bereich des Atriums.

Eine Kältemaschine (mit 260 kW, zwei Kaltwassersätze (58 bzw. 86 kW) sowie eine Umluftkühlung (36 kW) versorgten das Gebäude bis Mai 20107 kälteseitig. Vor Beginn der Sommerperiode 2017 wurde die Kältemaschine durch eine neue Anlage mit einer Nennkälteleistung von 223kW ersetzt. Diese lief seit dem 24.05.2017 im Probetrieb und wurde ab dem 29.05.2017 komplett in Betrieb genommen. Anhand der vorliegenden Schemata wurde das nachfolgende vereinfachte Prinzipschema der Wärme- und Kälteversorgung des DKB Gebäudes erstellt:

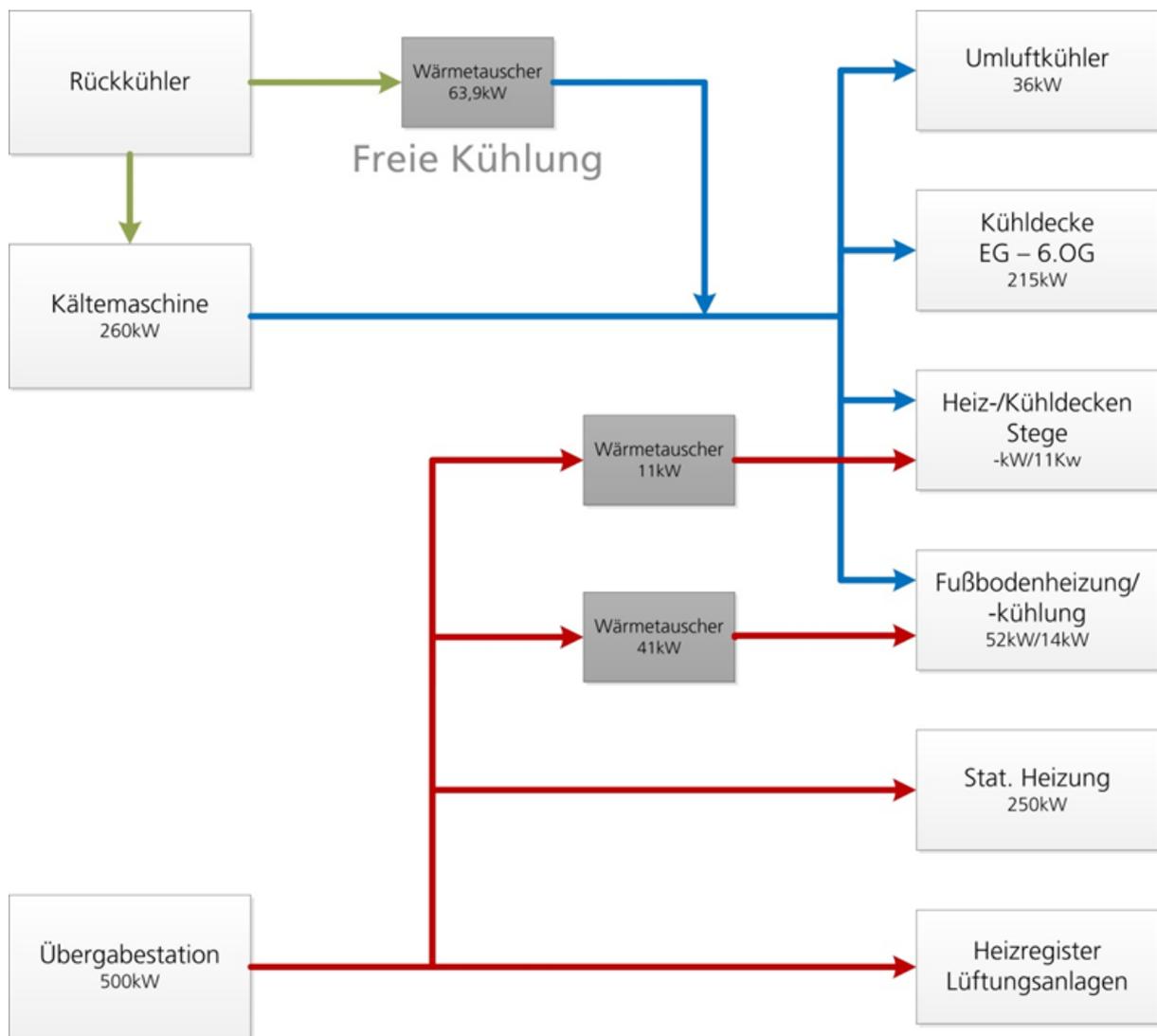


Abbildung 9.11-1: Prinzipschema TGA-Anlagen Heizen/Kühlen (@ Fraunhofer ISE)

Die Zuordnung von Kühlkreis und Kühldecke ist nicht eindeutig, in den Schemata sind zwei voneinander getrennte Kühlkreise, »Kühldecken EG 6.OG« sowie »Heiz-/Kühldecken Stege«, vorhanden. Weiterhin ist in den Schemata eine Anbindung der Fußbodentemperierung an den Kühlkreis eingezeichnet, hierzu sind jedoch keine Datenpunkte verfügbar. Zur Verdeutlichung wurden die in den Datenpunkten enthaltenen Heiz- und Kühlkreise in das Schema eingefügt:

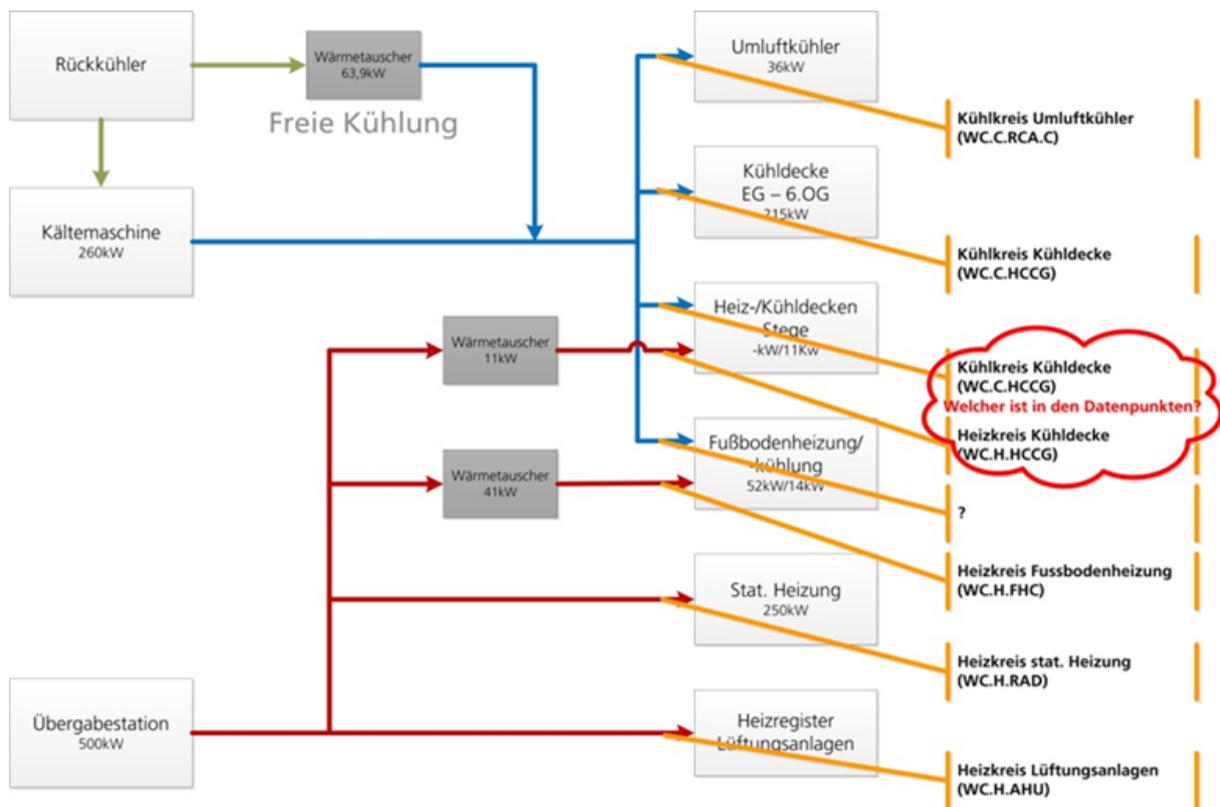


Abbildung 9.11-2: Prinzipschema TGA-Anlagen Heizen/Kühlen mit Zuordnung von Datenpunkten (@ Fraunhofer ISE)

Gebäudeautomation und Facility Management

Die Regelung und Steuerung der gebäudetechnischen Anlagen wird über DDC 3000-Zentralen von K&P realisiert. Die Anbindung der DDC Zentralen an eine Gebäudeautomation war 2013 noch nicht realisiert. Parallel zu der DDC3000-Zentralen wurde eine DDC 4000 installiert, die für das OBSERVE Projekt zur Messwerterfassung dient. Erfasst werden Messdaten aus Wärmemengen- und Stromzähler. Im Laufe des Projekts hat Kieback&Peter die Möglichkeit der Zuschaltung von wichtigen Signalen wie Ventil- und Klappenstellungen sowie Raumtemperaturen über ein Gateway zwischen der alten DDC3000 und der neuen DDC4000 geprüft. Aufgrund der bestehenden Infrastruktur war jedoch der technische und finanzielle Aufwand nicht vertretbar.

Das DKB Gebäude wird durch die internen FM-Dienste der DKB instandgehalten und optimiert. Laut DKB sind keine signifikanten Komfortprobleme bekannt, außer zu trockener Luft im Winter, was anlagentechnisch aber auch nicht behoben werden kann, da keine Möglichkeit zur Befeuchtung in den bestehenden RLT-Anlagen besteht. Hinter der West-Glasfassade zum Atrium kommt es im Winter bei starker Sonneneinstrahlung manchmal zu unangenehm hohen Temperaturen, so dass zeitweise in den Zonen auf Kühlbetrieb umgestellt wird, wenn dies nicht manuell unterbunden wird. Das Gebäude und die Installationen sind in einem guten Zustand, z. Z. sind mittelfristig keine Sanierungsmaßnahmen geplant. Einige Verbräuche lassen sich jedoch nicht vollständig erklären, v.a. die hohe Stromgrundlast. Nutzung der freien Kühlung für die Kühldecke nur bis ca. 12°C AUL-Temp. Aus der Sicht der DKB und von K&P sollen die Wärme-/Kälteerzeugung und -verteilung prioritär analysiert werden. Energieeinsparungen in Höhe von 5 bis 10 % können erwartet werden. Wärmeseitig wurden bereits zusätzliche Messeinrichtungen seitens K&P installiert, die eine detaillierte Betriebsaufnahme ermöglichen. Kälteseitig erfolgt dies zeitnah. Seitens der elektrischen Energieversor-

gung existieren zahlreiche Stromzähler, unterteilt in drei Zonen pro Etage. Diese eignen sich sehr gut um interne Lasten zu bestimmen (außer Personen befinden sich hier überwiegend elektrische Verbraucher).

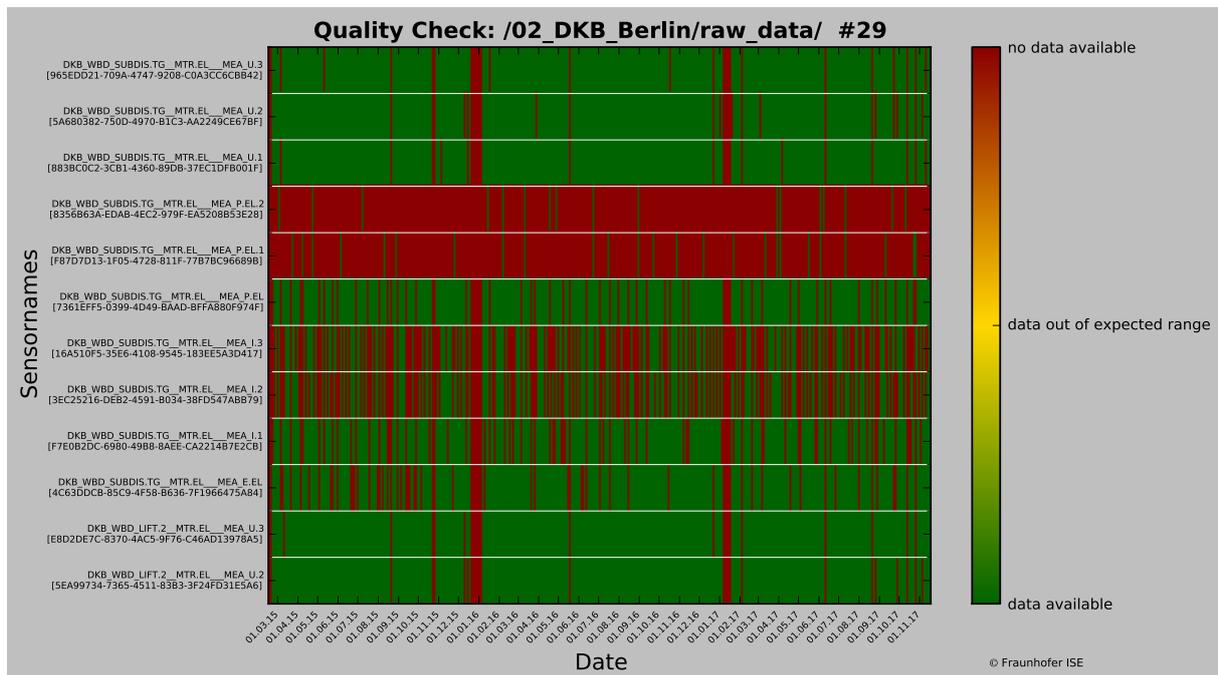


Abbildung 9.11-3: Carpetplot zu Datenqualität ausgewählter Datenpunkte im DKB Gebäude (@ Fraunhofer ISE)

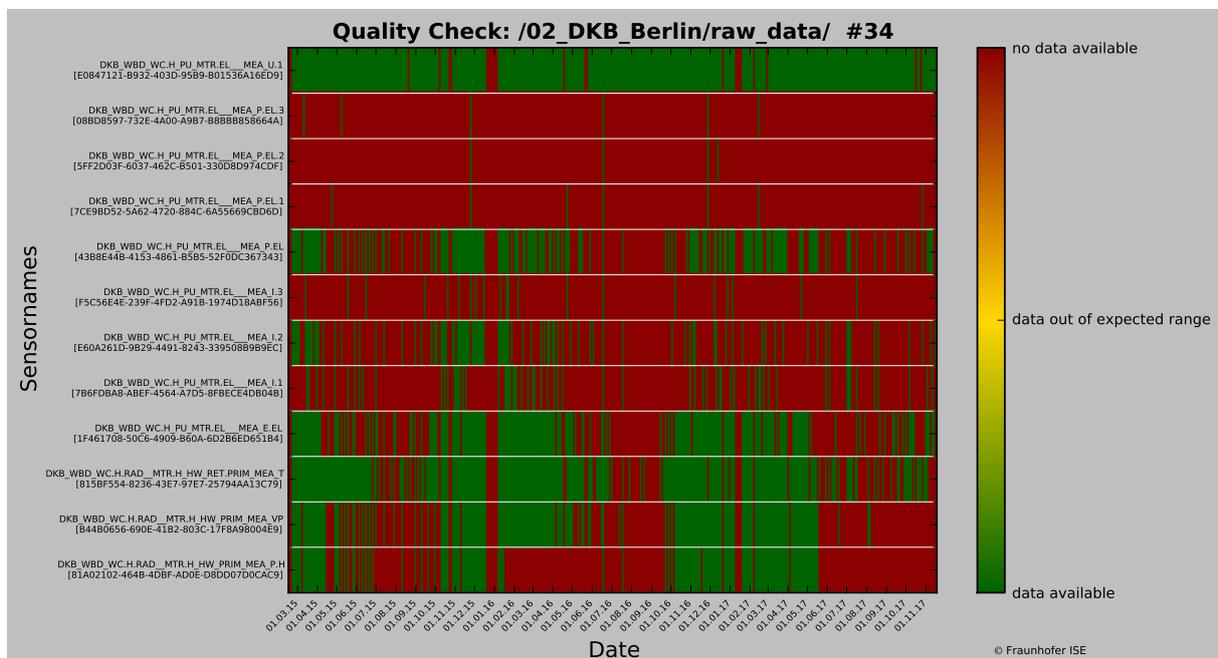


Abbildung 9.11-4: Carpetplot zu Datenqualität ausgewählter Datenpunkte im DKB Gebäude (@ Fraunhofer ISE)

Zielsetzung, Methodik und generelle Erkenntnisse

Mit dem Demonstrationsgebäude der DKB verfolgte das Fraunhofer ISE das Ziel, neu entwickelte Verfahren zur automatischen Fehlererkennung auf die Messdaten aus der Gebäudeautomation von Kieback&Peter anzuwenden, um Fehler im Betrieb der Anlagen zu identifizieren und Korrekturmaßnahmen abzuleiten. In einem ersten Schritt wurde versucht, Qualitative Modelle (QuaMo) von ausgewählten Systemen mit Messdaten zu trainieren und anschließend auf neue Messdatensätze anzuwenden. Aufgrund der niedrigen Qualität der Messdaten konnte QuaMo lediglich auf ein einzelnes Subsystem angewendet werden.

Es wurde dann entschieden den Betrieb der verschiedenen Systeme auf Basis von Regeln und Grafiken wie Zeitreihen-, Scatter- und Carpetplots auszuwerten. In einer ersten Phase wurden Messdaten aus einem Zeitraum vom 15.02.2015 bis 04.04.2016 ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertungen wurden zusammen mit den Konsortialpartnern Plenum und Kieback&Peter koordiniert und den Facility Managern der DKB im Juni 2016 in einem Bericht vorgelegt. Die Analyse der Messdaten lieferte eine Liste von 18 Unstimmigkeiten und Fehlern im Betrieb der Anlagen, aus denen Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden konnten. Mehrere Termine zwischen Kieback&Peter und der DKB im Zeitraum von November 2016 und Mai 2017 wurden organisiert, um die Umsetzung von korrektiven Maßnahmen einzuplanen. Nach Umsetzung von ausgewählten Maßnahmen erfolgte eine Bewertung deren Auswirkung auf den energetischen Betrieb der Anlagen. Für die Analyse des energetischen Betriebs und die Implementierung von Korrekturmaßnahmen in diesem Objekt ist es wichtig deutlich darauf hinzuweisen, dass durch die Beteiligung von Kieback&Peter als Projektpartner der Zugang zu wichtigen Parametern der Gebäudeautomation wie z.B. Parameter der verschiedenen Heizkennlinien, die nicht im Umfang der Monitoringdaten enthalten waren, stark vereinfacht wurde. Im Vergleich zu einem Prozess mit Beauftragung eines projektexternen Gebäudeautomationsdienstleisters bietet es aus organisatorischer und wissenschaftlicher Sicht deutliche Vorteile, u.a. hinsichtlich einer transparenten Kommunikation von Fehlern und Schwachstellen in der Gebäudeautomation. In der Parametrierung der Gebäudeautomation im DKB Gebäude wurden zahlreiche Optimierungspotentiale identifiziert. Gewisse Parameter in verschiedenen Regelkreisen, die der Nutzer oft manuell und ohne Dokumentation eingestellt hat, waren für die Durchführung des Monitorings nicht immer nachvollziehbar. Grundsätzlich ist die Lage der Datenerfassung des Gebäudes, im Hinblick auf die Anwendung von Methoden zur automatisierten Fehlererkennung verbesserungsfähig.

Messdatenerfassung, Messdatentransfer, -verarbeitung und -qualität

Insgesamt werden im Gebäude 441 Datenpunkte aus der Gebäudeautomation von Kieback&Peter erfasst. Ein Großteil der Datenpunkte stammen aus Stromzähler (Spannung, Strom, Leistung je Phase). Weiterhin werden Betriebsgrößen wie Vor- und Rücklauftemperaturen sowie Volumenströme von einzelnen Heiz- und Kühlkreisen über Wärmemengezähler aufgezeichnet. Der Datensatz enthält keine Wetterdaten, so dass für die nachfolgenden Betrachtungen die Außentemperaturmessungen der Zentrale von Kieback&Peter in Berlin herangezogen wurde. Dies kann die Ergebnisse und Erkenntnisse beeinträchtigen, weil die Messung nicht unmittelbar die lokal herrschenden Klimabedingungen erfasst. Jedoch ist dies angesichts der sonst nicht verfügbaren Messgröße hinnehmbar. Der Datensatz enthält keine Temperaturerfassung der Büroräume, so dass keine Komfortauswertungen durchgeführt werden konnten. Das Fraunhofer ISE importiert die Messdaten aus dem InterWatt-Server von IngSoft über tägliche https-Requests. Die Messdaten wurden dann anhand einem vereinheitlichen

Datenpunktschema mit standardisierten Datenpunktkennzeichner übersetzt und mit dem Monitoring-Werkzeug »DataStorage« in einer hdf5-Datenbank importiert, gefiltert und graphisch dargestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Messdaten im Allgemeinen in einer niedrigen Qualität (Datenlücken, Bereiche mit unplausiblen Werten) vorliegen (siehe 9.11-3 und 9.11-4). Dies schränkt die Anwendung von selbstlernenden Verfahren zur automatischen Fehlererkennung und Diagnose stark ein.

9.11.1 Fehlerliste (ISE)

Im DKB Gebäude wurden während der Projektlaufzeit durch die Projektpartner Plenum, Kieback&Peter und Fraunhofer ISE zahlreiche Fehler im Anlagenbetrieb sowie verbesserungsfähige Parameter in der Programmierung der Gebäudeautomation erkannt. Die Erkennung basierte auf die Nutzung regelbasierten Systeme, auf manuelle Prüfung von Messdaten dargestellt als Carpet und Scatterplots sowie durch Informationen des DKB Facility Managements. Teilweise konnten Fehler während der Projektlaufzeit behoben und Optimierungsmaßnahmen umgesetzt werden. Die Tabelle 9.11-1 liefert eine Übersicht der gefundenen Fehler.

Tabelle 9.11-1: Relevante Fehler

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
1	Hydraulischer Abgleich der Heizkreise: Volumenstrom der Fußbodentemperierung bricht tagsüber ein	Trenddaten	Abgleich vornehmen	gemeldet
2	Die Uhrzeit in der GLT/Datenbank stimmt nicht mit der tatsächlichen Uhrzeit überein	Trenddaten - Analyse Außentemperatur	Einstellen Uhrzeit, ggf. mit Zeitserver verbinden	behoben
3	Pumpenblockierschutz in allen Anlagen täglich während 2 Minuten aktiviert	Trenddaten	Änderung auf 1x wöchentlich	behoben
4	Heiz-/Kühldecke Stege: die zeitliche Verzögerung zwischen der Freigabe des Heiz- und Kühlbetriebs mit 10 min. zu niedrig	Trenddaten und GLT-Daten	Änderung der zeitlichen Verzögerung auf 12 Stunden	behoben
5	Heiz-/Kühldecke Stege: niedriger Grenzwert für die Freigabe des Kühlbetriebs bei Außenlufttemperatur $T_{A} \geq 10^{\circ}\text{C}$	GLT-Daten	Änderung der Freigabe des Kühlbetriebs bei $T_{A} \geq 17^{\circ}\text{C}$	behoben
6	Heiz-/Kühldecke Stege: lange Nutzzeiten Heizfall Mo-Fr. 6-22 Uhr	Trenddaten/Zeitplanerkennung	Änderung auf Mo-Fr. 6-20	behoben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
7	Heiz- und Kühlkreis Deckenkühlung EG-6.OG (KAE Kühldecken Büros), Kühlkreis Umluftkühlgeräte, Heizkreis RLT03: diese Kreisläufe werden während einer signifikanten Anzahl an Betriebsstunden mit einer verschlechterten Spreizung betrieben. Dies führt zu einem höheren Hilfsenergieverbrauch der Pumpe und einer reduzierten Effizienz bei der Kälte- bzw. Wärmeerzeugung.	Regelbasiert	Prüfung der Pumpengröße und -einstellung, Abschaltung des Kühl- bzw. Heizbetriebs bei zu niedrigen oder positiven Spreizung (Kühlfall)	anstehend
8	Fußbodenheizung Heizfall: Steigung der Heizkennlinie und Grenzwerte zur Abschaltung des Kreises (Stand-by Tag und Nacht	GLT-Daten	Änderung der Steigung von 1.0 auf 0.7, Stand-by Tag von 15 auf 18 °C und Stand-by Nacht von 12 auf 16 °C geändert	behaben
9	Fußbodenheizung Kühlfall: Freigabe Kühlen, fehlendes Totband zwischen Heizen und Kühlen, zeitliche Verzögerung zwischen Heizen und Kühlen zu klein, Nutzzeiten von So:13 bis Fr: 19 Uhr zu lang	Trenddaten und GLT-Daten	Anhebung der Freigabe Kühlen von 16 °C auf 17 °C, Programmierung Totband von 2 K zwischen Heizen und Kühlen, zeitliche Verzögerung zwischen Heizen und Kühlen auf 12 Stunden erhöht, neue Nutzzeiten Mo-Fr. 6-20 Uhr	behaben

	Fehler	Erkannt durch	Maßnahme	Status
10	Statische Heizung: keine Nachtabsenkung	Trenddaten und GLT-Daten	Nachtabsenkung von -10K aktiviert	behoben
11	Statische Heizung: gleiche Sollwerte für StandbyTag und StandbyNacht = 10 °C (werden saisonal verändert)	GLT-Daten	StandbyTag = 18 °C, Standby-Nacht = 16 °C (aktiviert durch DKB, 1K Hysterese)	behoben
12	Statische Heizung: Nutzzeiten zu lang Mo: 2-21 Uhr, Di-Fr: 5:20 – 21 Uhr, Sa: 6:07 – 18 Uhr	Trenddaten und Zeitplanerkennung	Neue Nutzzeiten Mo: 2-20 Uhr, Di – Fr.: 5:30 – 20 Uhr	behoben
13	Heizkreis Lüftung RLT 03: Durchfluss nachts und am Wochenende höher als zur Nutzzeit. Hoher Massenstrom bei geringer/keiner Wärmeabnahme, unnötiger Pumpenstrom sowie Rücklaufanhebung als Konsequenz	Regelbasiert und Trenddaten	Standby Tag von 16 °C auf 18 °C, StandBy Nacht: von 10 °C auf 12 °C	behoben
14	Heizkreis Lüftung RLT 03: Nutzzeiten: Mo: 03 – 20 Uhr, Die – Fr: 4- 20 Uhr, Sa+So: 09:45 – 10 Uhr ! sehr frühe Einschaltzeiten, am Wochenende für 15 Min. sinnlos	Regel und Trenddaten	Neue Nutzzeiten RLT03: Mo – Fr: 6:35 – 19:00 Uhr; RLT02: Mo – Fr: 6:40 – 19:00 Uhr	behoben
15	Kältemaschine 260 kW: Temperaturmessungen des Kaltwassers liegen nicht vor. Laut Prinzipschema erzeugt die Kältemaschine 6 °C Kaltwasser wobei diese in den verschiedenen Übergabesysteme (Kühldecken und Umluftkühlgeräte) auf min. 16 °C verbraucht wird.	Planungsunterlagen	Es wird empfohlen zu prüfen, ob die Systemtemperaturen auf 12 °C/18 °C angehoben werden können.	anstehend

9.11.2 Regelungseinstellungen, identifizierte Fehler, Korrekturmaßnahmen der gebäudetechnischen Anlagen (ISE)

9.11.2.1 Stromversorgung (ISE)

Lastgangmessungen des Gesamtstromverbrauchs liegen in separaten Dateien des Energieversorgungsunternehmens vor, und wurden vom Gebäudebetreiber geliefert. Auf dieser Basis wurden Monatsverbräuche im Zeitraum von Mai 2012 bis November 2017 ermittelt die in 9.11-5 abgebildet sind. Die Messungen zeigen, dass der Gesamtstromverbrauch des Gebäudes zwischen 2012 und 2017 gestiegen ist. Gründe hierfür

sind nicht bekannt. Im Sommer steigt der Stromverbrauch höchstwahrscheinlich aufgrund des höheren Kühlbedarfs.

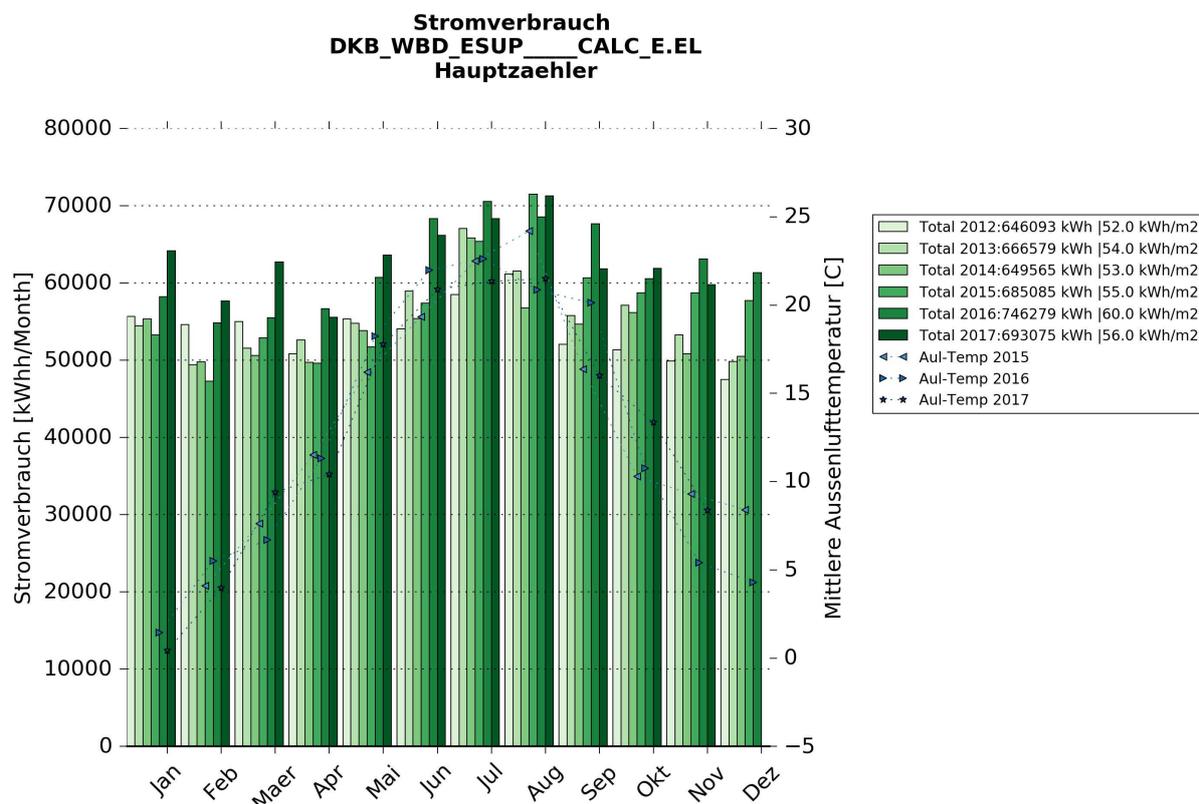


Abbildung 9.11-5: Stromverbrauch (@ Fraunhofer ISE)

9.11.2.2 Wärmeversorgung (ISE)

Eine Messung des Wärmeverbrauchs vom Fernwärmeanschluss liegt nicht vor. Lediglich Monatsverbräuche aus der Abrechnung des Wärmelieferants wurden von der DKB zur Verfügung gestellt. Der Verlauf des Wärmeverbrauchs zwischen Januar 2013 und April 2017 und von vorliegenden Messungen des Außenlufttemperaturmittelwerts von 2015 bis 2017 sind in Abbildung 9.11-6 abgebildet. Abbildung 9.11-7 zeigt witterungsbereinigte Daten (Ref. Gradtsgzahl Wetterstation Berlin-Tempelhof). Eine Reduzierung des Wärmeverbrauchs während den letzten drei Jahren ist nicht erkennbar. Im Gegenteil ist der witterungsbereinigte Wärmeverbrauch seit 2014 um ca. 20% gestiegen. Die Messungen aus den ersten Monaten 2017 lassen auf eine Stabilisierung bzw. eine leichte Absenkung des Wärmeverbrauchs hindeuten. Dies sollte mit Messdaten aus der letzten Heizperiode (Herbst 2017) bestätigt werden. Zum Zeitpunkt des Berichts sind leider Messdaten, die die Auswirkung verschiedener Optimierungsmaßnahmen auf den Wärmeverbrauch darstellen könnten leider nicht vorhanden.

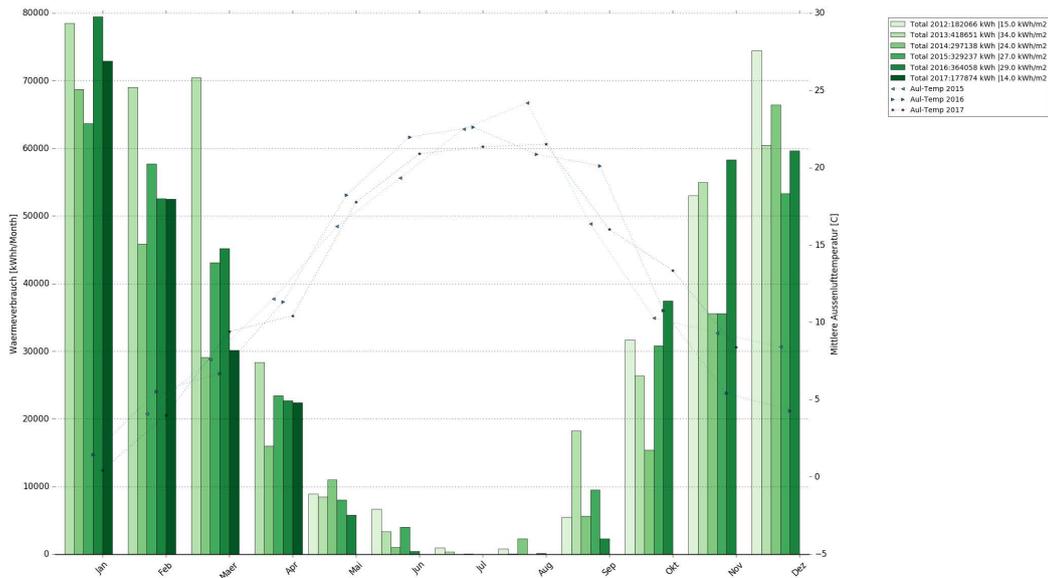


Abbildung 9.11-6: Fernwärmeverbrauch (Daten aus 2017 sind unvollständig) (@ Fraunhofer ISE)

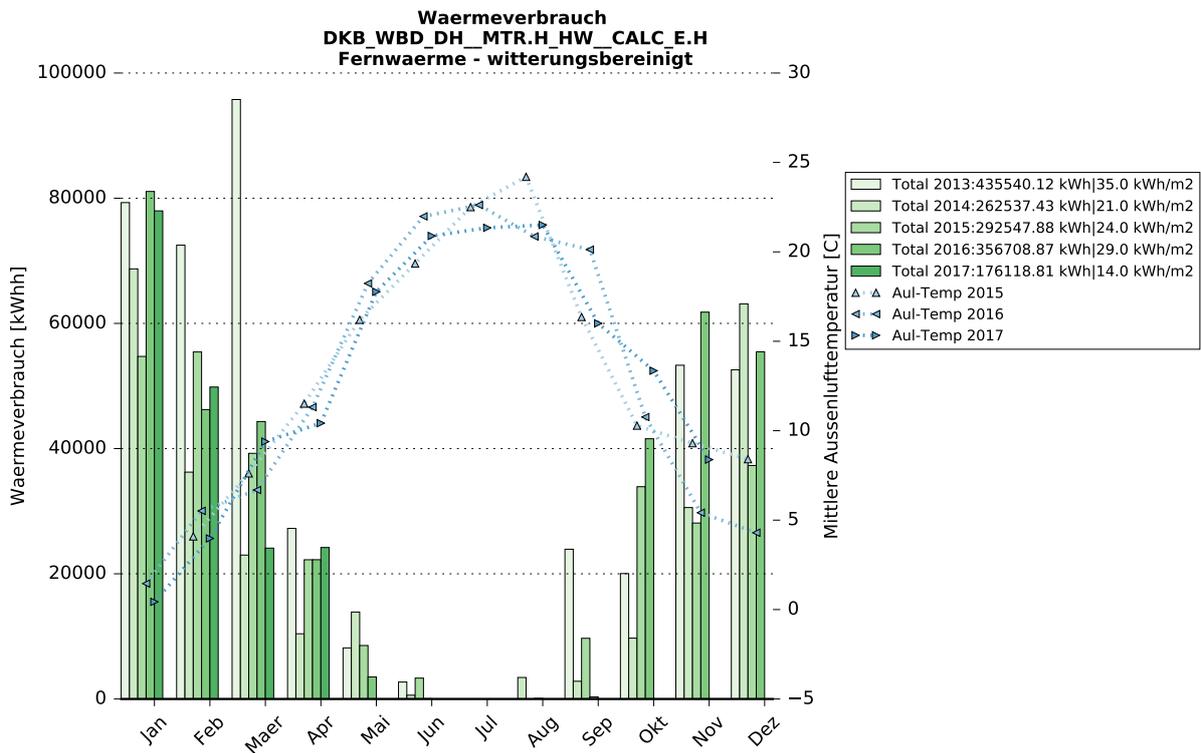


Abbildung 9.11-7: Fernwärmeverbrauch (Daten aus 2017 sind unvollständig) (@ Fraunhofer ISE)

9.11.2.3 Kälteerzeugung (ISE)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Auswertung des energetischen Betriebs folgender Kältemaschinen des DKB Gebäudes zwischen Februar 2015 und November 2017 dargestellt:

- Kältemaschine 260 kW
- Kältemaschine RLT02
- Kältemaschine RLT03

Kältemaschine 260 kW

In den vergangenen 2 Jahren sind laut Betreiber außergewöhnlich viele Reparaturen an der großen Kältemaschine durchgeführt worden. Im Auftrag des Vermieters wurde die Kältemaschine in der 20./21.KW 2017 ausgetauscht und die neue Kältemaschine am 29.05.17 final in Betrieb genommen. Die Kälteleistung der neuen Kältemaschine wurde auf 85% der ursprünglichen Kälteleistung auf 222 kW reduziert. Die nominale elektrische Leistungsaufnahme der neuen Kältemaschine beträgt laut Herstellerdatenblätter 45.6 kW. Der Wärmetauscher für die freie Kühlung wurde auch erneuert und auf die doppelte Leistung (120 kW) ausgelegt, um die freie Kühlung häufiger nutzen zu können.

Für die Auswertung des Betriebs der großen Kältemaschine liegen nur Stromzählerdaten der Kältemaschine und des Rückkühlwerks vor. Die Kältemenge sowie die Systemtemperaturen der Kälteerzeugung werden nicht erfasst.

- Temperaturmessungen des Kaltwassers liegen nicht vor. Laut Prinzipschema erzeugt die Kältemaschine 6 °C Kaltwasser wobei diese in den verschiedenen Übergabesysteme (Kühldecken und Umluftkühlgeräte) auf min. 16 °C verbraucht wird. Es wird empfohlen zu prüfen, ob die Systemtemperaturen auf 12 °C/18 °C angehoben werden können, um den Exergieinsatz der Kälteerzeugung zu reduzieren.
- Die Messungen zeigen, dass die elektrischen Leistungen bei hohen Außenlufttemperaturen weit unterhalb der elektrischen Nennleistung der Kältemaschine (4 Kompressoren à 29 kW) liegen (siehe Abbildung 9.11-8). Ursache hierfür war ein defekter Kompressor seit Anfang des Messbeginns.
- Seit Inbetriebnahme der neuen Kälteanlage Ende Mai 2017 ist eine Verringerung des Stromverbrauchs für die Kälteerzeugung in Abbildung 9.11-9 erkennbar. Einzelne Messungen des Stromverbrauchs von der alten Kältemaschine reißen an manchen kalten Tagen aus. In der nächsten Winterperiode sollte geprüft werden, ob diese noch vorkommen und ggf. eine Prüfung der Regelungsparameter angestoßen werden.
- An Tagen zwischen August 2016 und August 2017, die vergleichbare Außenlufttemperaturmittelwerten aufweisen wurde der Stromverbrauch um ca. 20 % reduziert (siehe Abbildung 9.11-10). Dieser Trend soll noch während der nächsten Kühlperiode überprüft werden, da 2017 in Berlin bisher deutlich kälter als 2016 und 2015 war (Kühlgradstunden $G_{k2015}=4096$ K.d, $G_{k2016}=3474$ K.d, $G_{k2017}=2363$ K.d mit $T_{in}=26$ °C und $T_{Kuehlgrenze}=18$ °C).

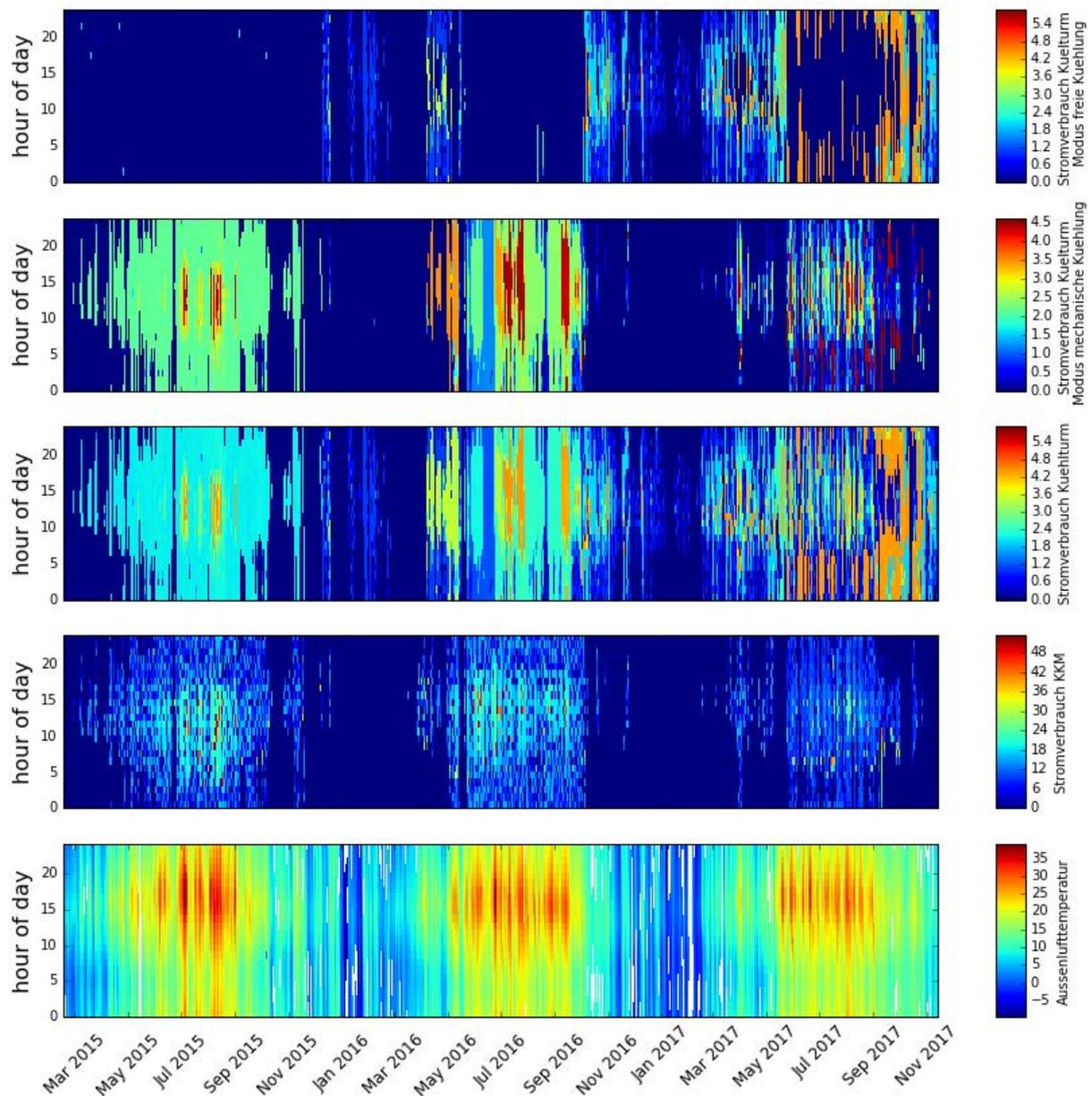


Abbildung 9.11-8: Elektrische Leistungsaufnahme Kälteanlage und Rückkühlung (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine, Elektrische Leistungsaufnahme Rückkühlung, Elektrische Leistungsaufnahme Rückkühlung mechanische Kühlung, Elektrische Leistungsaufnahme Rückkühlung freie Kühlung (@ Fraunhofer ISE)

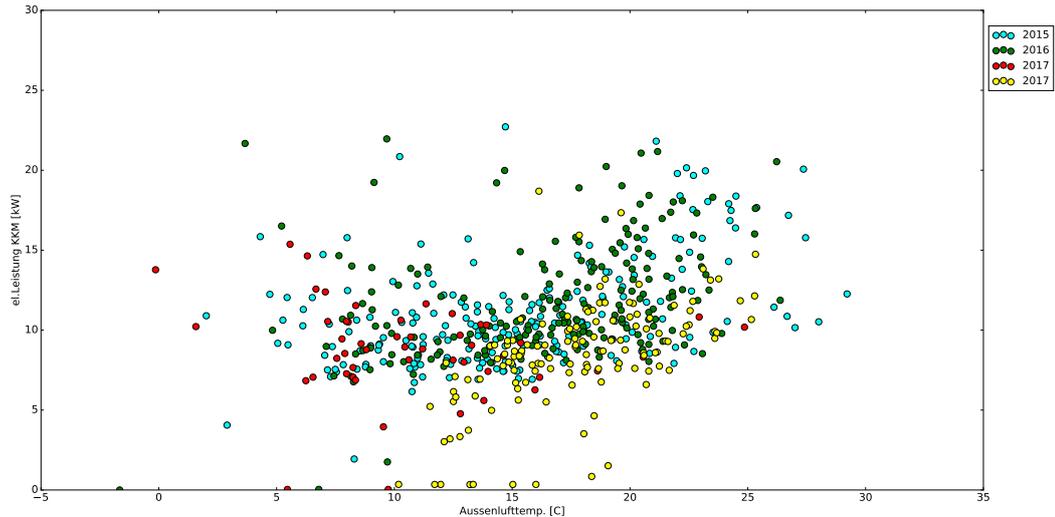


Abbildung 9.11-9: Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine 2015-2017 - Tagesmittelwerte - Gelb: neue Kältemaschine (@ Fraunhofer ISE)

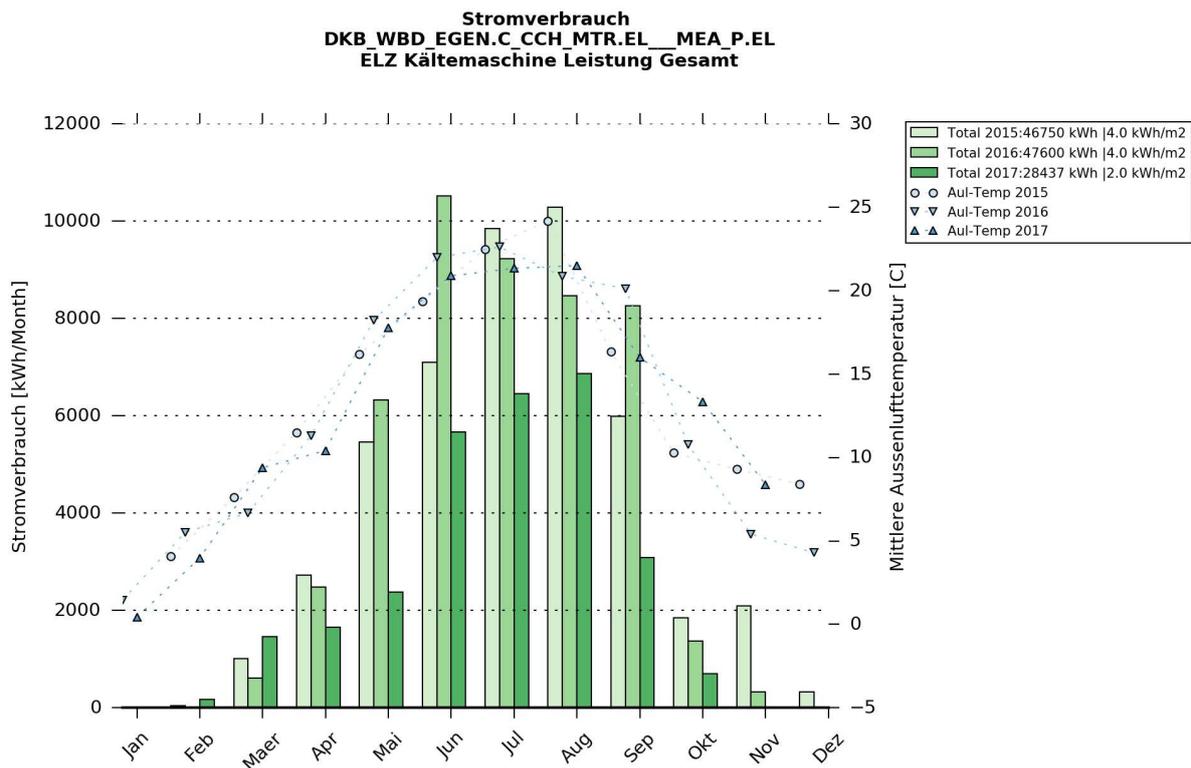


Abbildung 9.11-10: Stromverbrauch Kälteanlage (@ Fraunhofer ISE)

Kältemaschine RLT02 und Kältemaschine RLT03

- Die Messdaten der Stromzähler zeigen keine nennenswerten Änderungen des energetischen Betriebs beider Kältemaschinen weder bei den Betriebszeiten (siehe 9.11-11 und 9.11-12) noch beim Stromverbrauch (siehe 9.11-13 und 9.11-12).

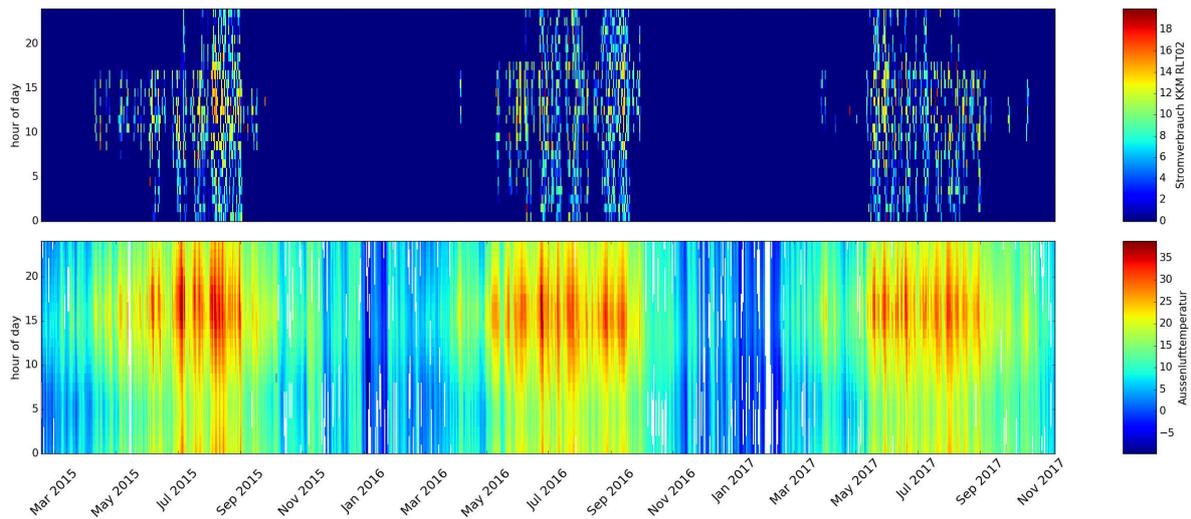


Abbildung 9.11-11: Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine RLT02 (Carpet-plot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine (@ Fraunhofer ISE)

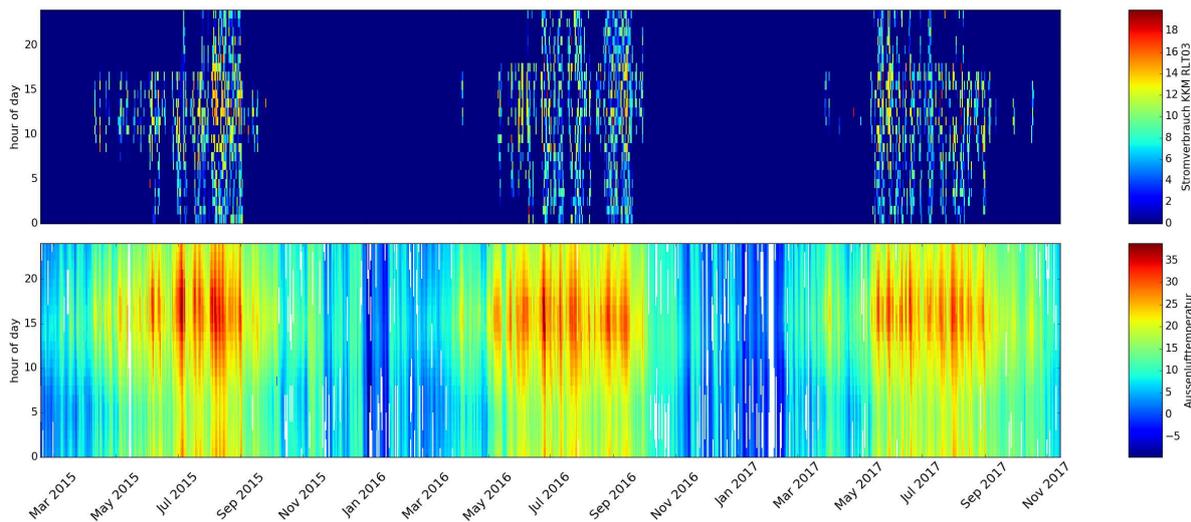


Abbildung 9.11-12: Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine RLT03 (Carpet-plot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine (@ Fraunhofer ISE)

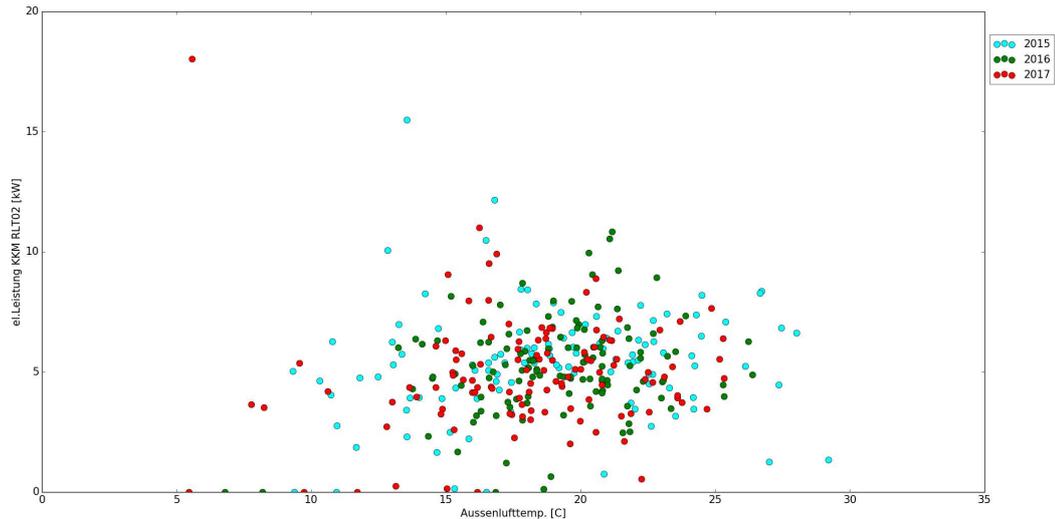


Abbildung 9.11-13: Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine RLT02 2015-2017 - Tagesmittelwerte (@ Fraunhofer ISE)

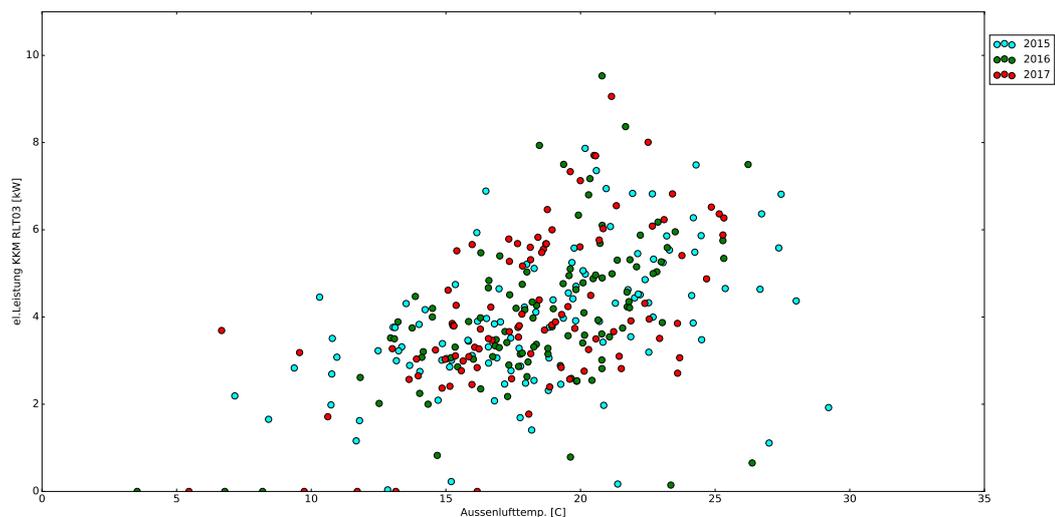


Abbildung 9.11-14: Elektrische Leistungsaufnahme Kältemaschine RLT03 2015-2017 - Tagesmittelwerte (@ Fraunhofer ISE)

9.11.2.4 Heiz-/Kühlkreise (ISE)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Auswertung des energetischen Betriebs folgender Heiz- und Kühlkreisen des DKB Gebäudes zwischen Februar 2015 und November 2017 dargestellt:

- Heiz-/Kühlkreis Deckenheizung/-kühlung (KAE Kühldecken Büros)
- Kühlkreis Umluftkühlgeräte
- Heizkreis Fußbodentemperierung

- Heizkreis Statische Heizung
- Heizkreis RLT 03

Wenn verfügbar, basiert die Analyse des Betriebs der Heizkreise auf Messdaten des Durchflusses, der thermischen Leistung und der Vor- und Rücklauftemperaturen, die von Wärmemengezähler geliefert werden. Betriebsrückmeldungen von Pumpen sowie Stellsignale von Ventile sind nicht vorhanden.
Heiz- und Kühlkreis Deckenkühlung EG-6.OG (KAE Kühldecken Büros)

Funktion

Im Kühlbetrieb hat der Kühlkreis eine thermische Nennleistung von 215 kW und wird über eine Beimischschaltung mit Kaltwasser 6/12°C primärseitig und 16/18° C sekundärseitig mittels einer drehzahlgeregelten Umwälzpumpe ($V=92.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H= 9.3 \text{ mWs}$) versorgt. Der Kühlbetrieb wird bei Überschreitung eines Tagesmittelwerts der Außenlufttemperatur von 10°C und bei Überschreitung eines Raumtemperaturmittelwerts von 20°C von 3 Referenzräumen freigegeben. Programmierte Nutzungszeiten für den Kühlbetrieb sind: So - Fr: 13-19 Uhr auf einem Raumsollwert von 19°C. Im Heizbetrieb beträgt der Raumtemperatursollwert 22°C. Der Heizbetrieb wird ab Unterschreitung einen Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur von 8°C freigegeben. Das Totband zwischen der Umschaltung von Heiz- auf Kühlbetrieb liegt somit bei 2K. Die zeitliche Verzögerung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb beträgt 10 min. In Räumen mit Einzelraumregelungen ist ein paralleler Betrieb der Kühldecken und der statischen Heizung möglich. *Identifizierte Fehler, Auswertungen, Korrekturmaßnahmen*

- Es wurde festgestellt, dass die Vor- und Rücklauftemperaturen des Wärmemengezählers in der Gebäudeautomation vertauscht sind. Die Datenpunktlisten wurde aus Konsistenzgründen nicht verändert. In den folgenden Auswertungen wurde dieser Fehler berücksichtigt.
- Die zeitliche Verzögerung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb von 10 min kann zu einem zu schnellen Takten zwischen beiden Betriebsarten führen. Als Korrekturmaßnahmen wurde die zeitliche Verzögerung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb auf 12 Stunden erhöht. Diese Maßnahme könnte zeitweise den thermischen Komfort beeinträchtigen.
- Der Grenzwert für die Freigabe des Kühlbetriebs wurde von 10°C auf 17°C und für den Heizbetrieb von 8°C auf 15°C angehoben.
- Der Kühlkreis ist während des gesamten betrachteten Zeitraums in Betrieb. Einige Datenlücken sind erkennbar (siehe weiße Streifen im Carpetplot 9.11-15)
- Der Durchfluss zeigt bis zur Umstellung der Kältemaschine ein klares Tagesmuster, außerhalb der Nutzungszeiten fallen die Werte deutlich ab. Ab dem 24.05.2017 ist ein solches Muster nur sehr schwach zu erkennen. Der Kühlkreis wird seit Umtausch der Kältemaschine außerhalb der Nutzungszeiten betrieben. (siehe Carpetplot 9.11-15)
- Abbildung 9.11-16 zeigt, dass der parallele Betrieb der Kühldecken und der statischen Heizung im Winter und Frühling bis Mai vorkommt.

- Die Verteilungswerte der Temperaturspreizung zeigen, dass die Vorlauftemperatur in einem nahezu konstanten Bereich bei 16.6°C geregelt wird und, dass die Rücklauftemperatur sich bei 18.0°C einstellt (siehe Abbildungen 9.11-18 und 9.11-19). Der Medianwert der Temperaturspreizung liegt bei -1.4 K über die 3 Jahre (siehe Abbildung 9.11-20). Diese Darstellung zeigt auch, dass der Kühlkreis während einer signifikanten Anzahl an Betriebsstunden mit einer verschlechterten Spreizung betrieben wird. Dies führt zu einem höheren Hilfsenergieverbrauch der Pumpe und einer reduzierten Effizienz bei der Kälteerzeugung. Wir empfehlen eine Prüfung der Pumpengröße und -einstellungen.

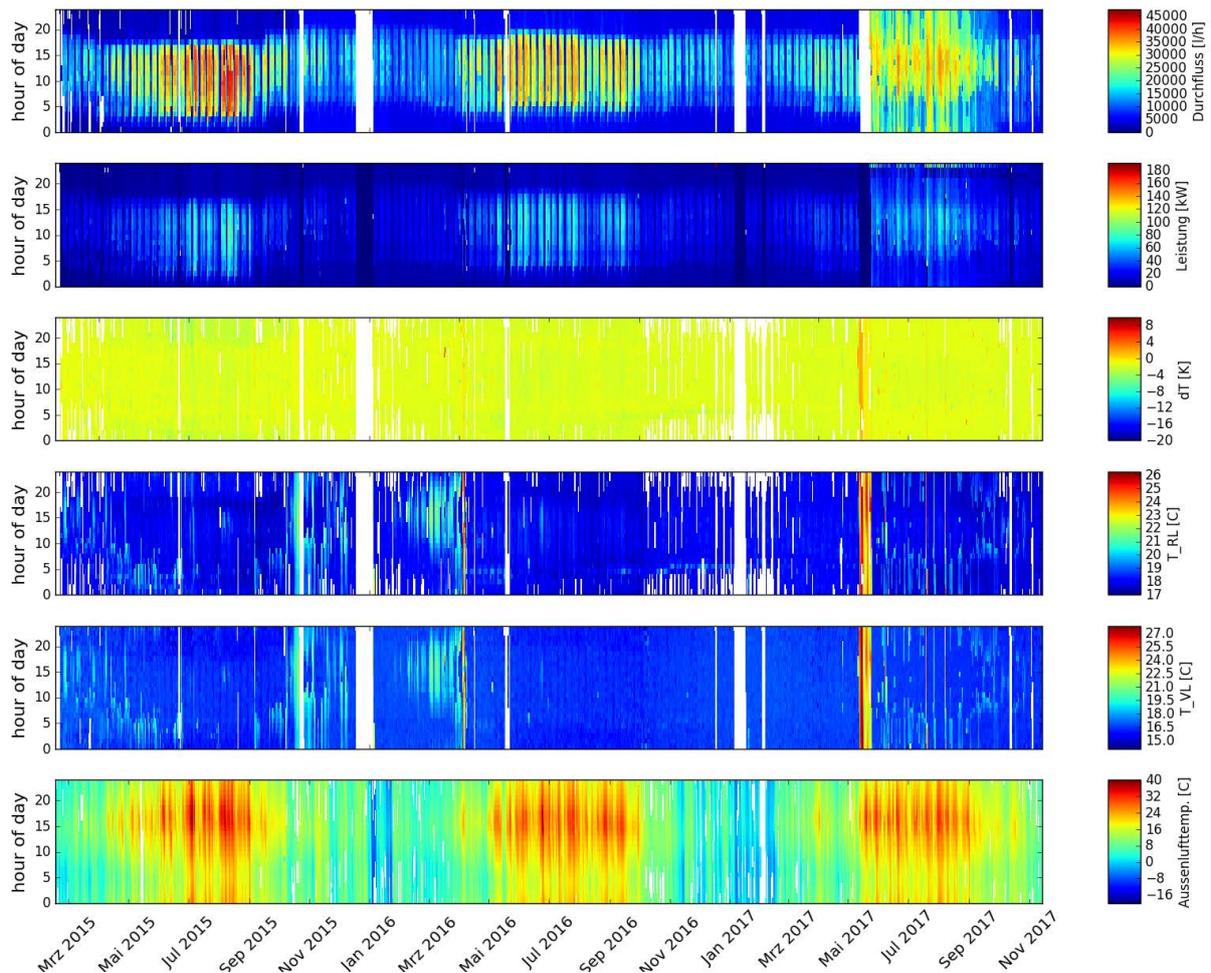


Abbildung 9.11-15: Heiz-/Kühlkreis Deckenheizung/-kühlung (KAE Kühldecken Büros) (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), Rücklauftemperatur (T_RL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

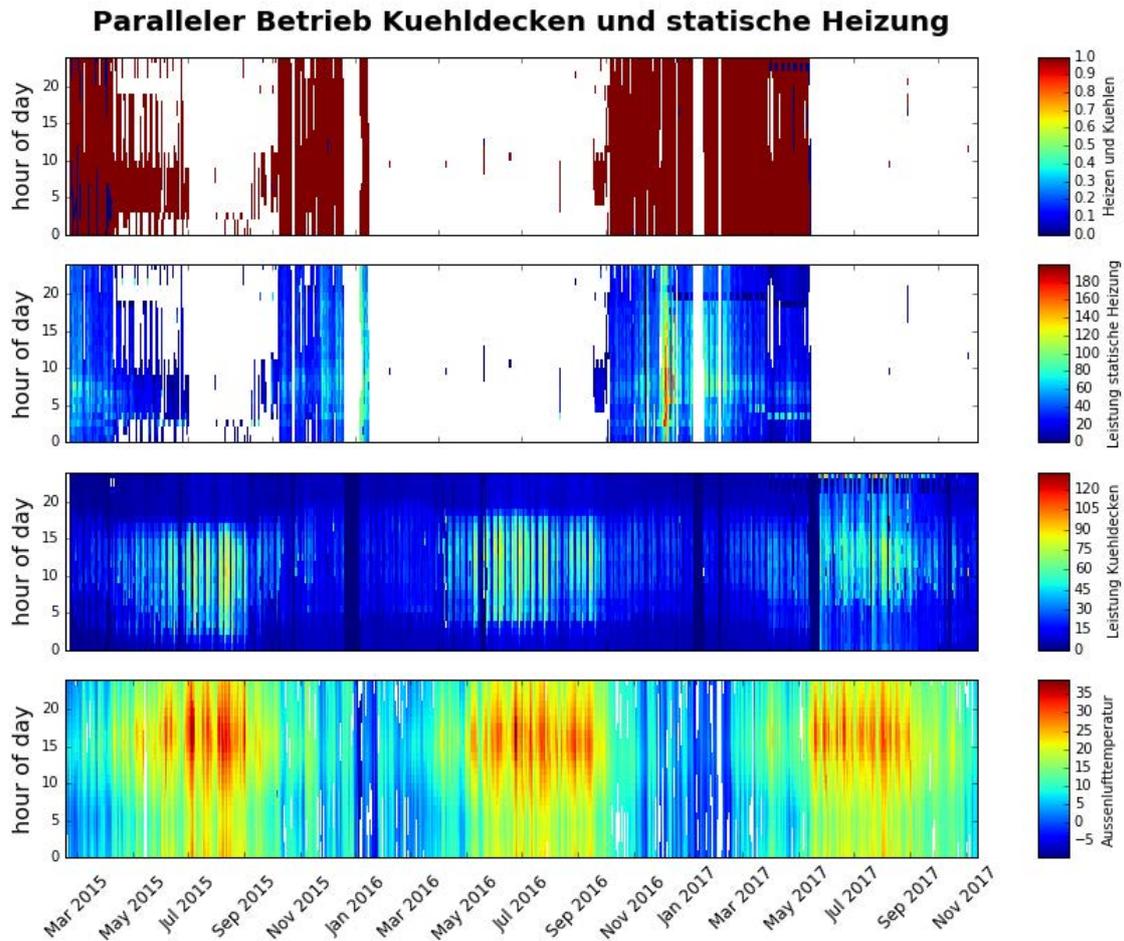


Abbildung 9.11-16: Paralleler Betrieb der Kuehldecken und der statischen Heizung (Carpetplot) Von unten nach oben: Aussenlufttemperatur, Leistung Kuehldecken, Leistung statische Heizung, Signal des parallelen Betriebs (@ Fraunhofer ISE)

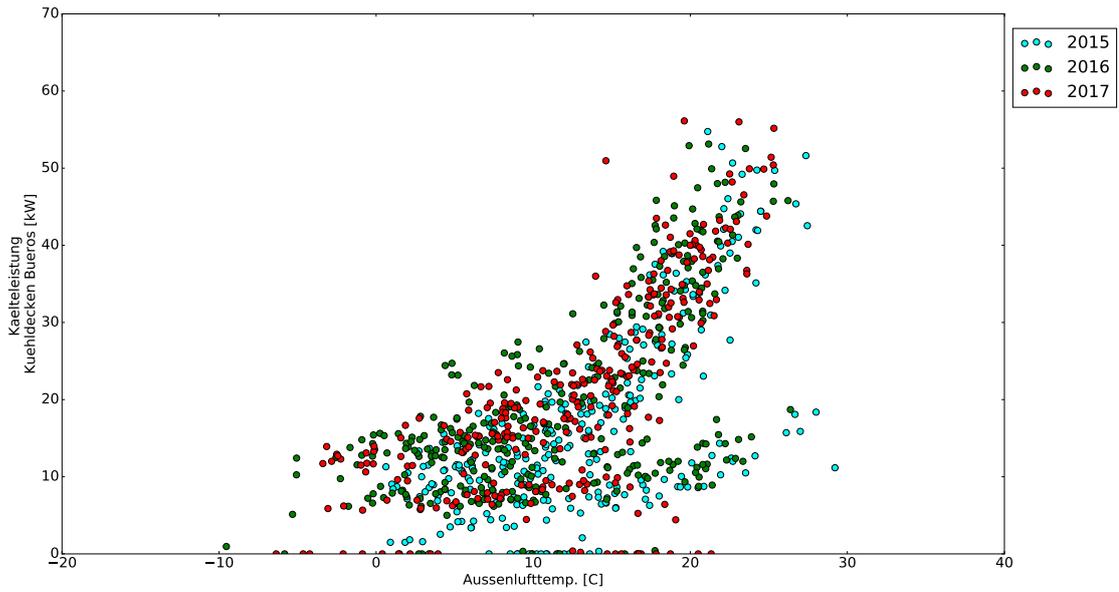


Abbildung 9.11-17: Kälteleistung Deckenkühlung - Tagesmittelwerte (@ Fraunhofer ISE)

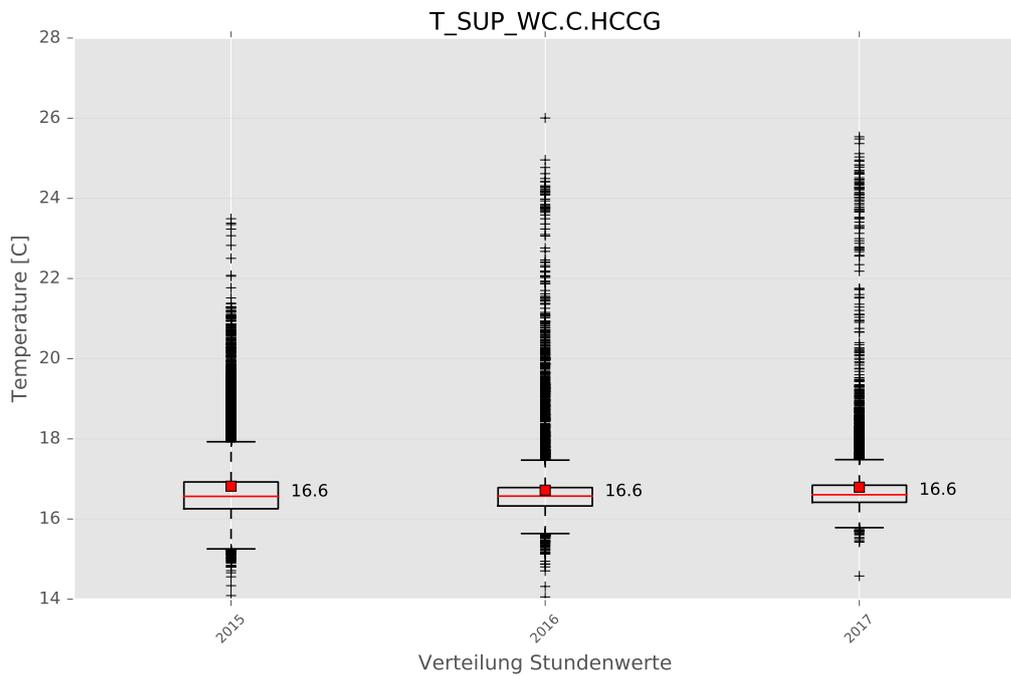


Abbildung 9.11-18: Kühlkreis Deckenkühlung - Verteilung der Vorlauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

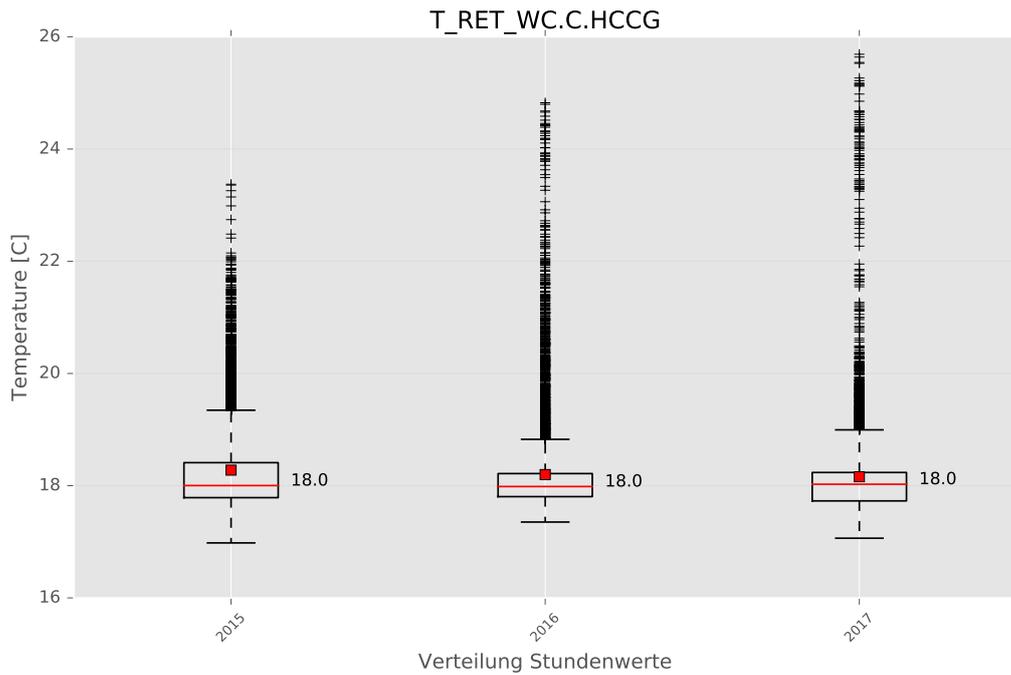


Abbildung 9.11-19: Kühlkreis Deckenkühlung - Verteilung der Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

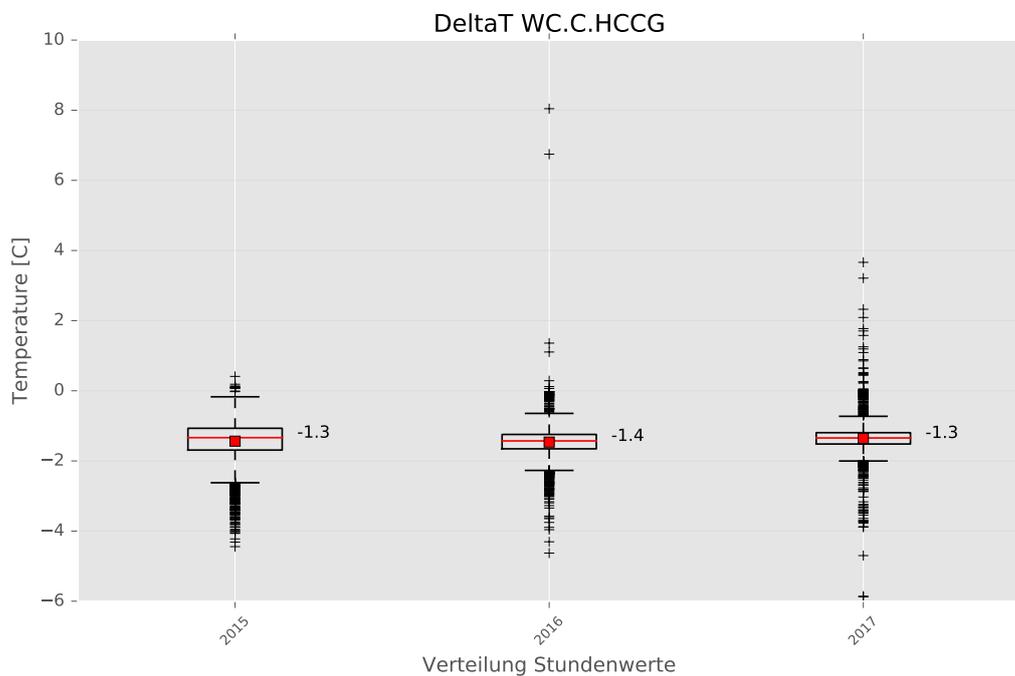


Abbildung 9.11-20: Kühlkreis Deckenkühlung - Verteilung der Temperaturspreizung (@ Fraunhofer ISE)

Heiz- und Kühlkreis Heiz-/Kühldecke Stege

Funktion

Im Kühlbetrieb hat der Kühlkreis eine thermische Nennleistung von 14 kW. Primärseitig wird er über einen zwischengeschalteten Plattenwärmetauscher mit Kaltwasser 6/12 °C versorgt. Sekundärseitig mit Kaltwasser 16/21 °C über eine Beimischschaltung und eine drehzahlgeregelte Umwälzpumpe ($V=2.4 \text{ m}^3/\text{h}$, $H= 4.0 \text{ mWs}$). Der Kühlbetrieb wird bei Überschreitung eines Tagesmittelwerts der Außenlufttemperatur von 10 °C und bei Überschreitung eines Raumtemperaturmittelwerts von 20 °C von 3 Referenzräume freigegeben. Programmierte Nutzungszeiten für den Kühlbetrieb sind: So - Fr: 13-19 Uhr auf einem Raumsollwert von 19 °C.

Im Heizbetrieb beträgt der Raumtemperatursollwert 22 °C. Der Heizbetrieb wird ab Unterschreitung eines Tagesmittelwerts der Außenlufttemperatur von 8 °C freigegeben. Das Totband zwischen Heiz- und Kühlbetrieb liegt somit bei 2K. Die zeitliche Verzögerung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb beträgt 10 min. Programmierte Nutzungszeiten für den Heizbetrieb sind: Mo - Fr: 6-22 Uhr auf einem Raumsollwert von 22 °C. Die Heizkennlinie hat folgende Einstellungen: EF (Steigung) =1.5, KH (Parallelverschiebung)=0, Absenkung -6 K.

Identifizierte Fehler, Auswertungen, Korrekturmaßnahmen

- Der Wärmemengezähler des Heizkreises lieferte keine sinnvollen Werte (konstanter Durchfluss) über längere Zeiträume. Nach Überprüfung wurde das Analog-Modul am 30.11.2016 ausgewechselt.
- Die zeitliche Verzögerung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb von 10 min kann zu einem zu schnellen Takten zwischen beiden Betriebsarten führen. Als Korrekturmaßnahmen wurde die zeitliche Verzögerung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb auf 12 Stunden erhöht.
- Der Grenzwert für die Freigabe des Kühlbetriebs wurde von 10 °C auf 17 °C und für den Heizbetrieb von 8 °C auf 15 °C angehoben.
- Die Nutzungszeiten wurden auf Mo – Fr.: 6 – 20 Uhr verändert.
- Abbildung 9.11-21 zeigt, dass der Heizbetrieb lediglich in den Wintermonaten stattfindet. Jedoch können keine belastbare Rückschlüsse über den Betrieb dieses Kreises aufgrund der großen Datenlücken gezogen werden.
- Ab Anfang 2017 hat der Gebäudebetreiber die Heiz-/Kühldecken im Heizfall ausgeschaltet, da diese laut seiner Aussage einen zu geringen Beitrag liefern.

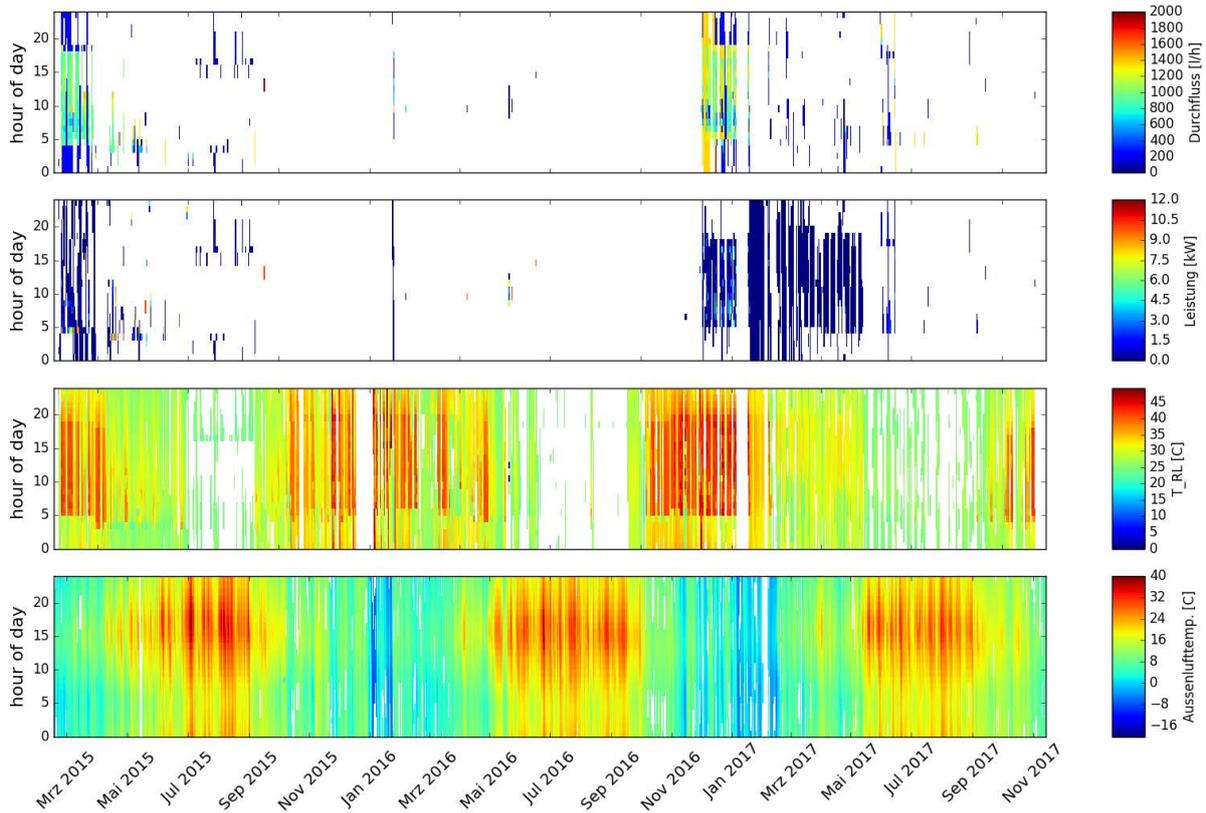


Abbildung 9.11-21: Heiz-/Kühlkreis Stege (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), Rücklauftemperatur (T_RL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

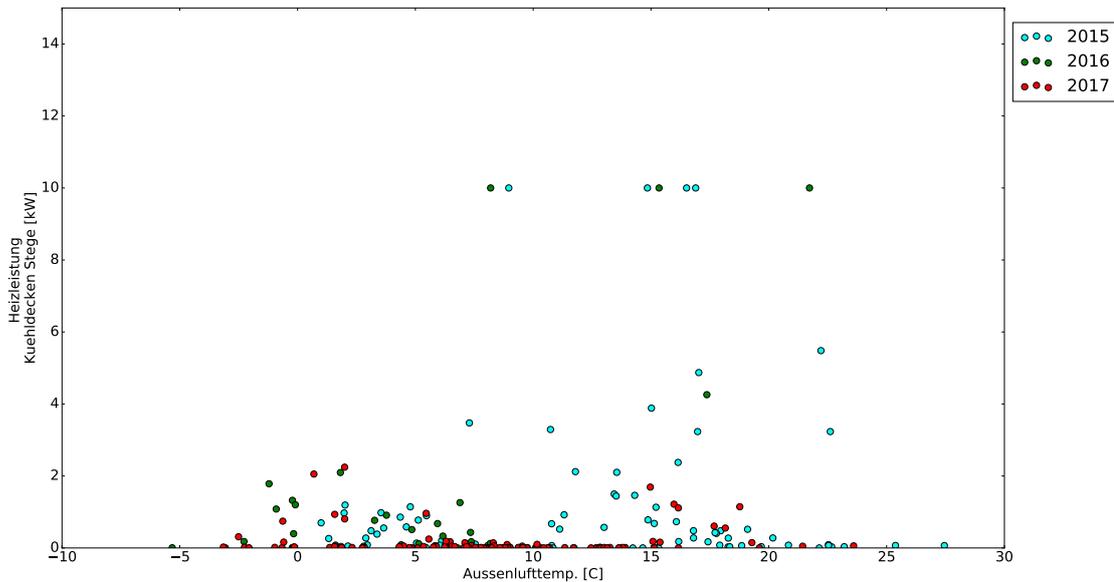


Abbildung 9.11-22: Heizleistung Heiz-/Kühlkreis Stege - Tagesmittelwert (@ Fraunhofer ISE)

Heizkreis Statische Heizung

Funktion

Der Heizkreis statische Heizung hat eine thermische Nennleistung von 250 kW und wird über eine Beimischschaltung mit Warmwasser 70/45 °C mittels einer drehzahlregelten Umwälzpumpe ($V=8,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 5,0 \text{ mWs}$) versorgt. Die Heizkennlinie hat folgende Einstellungen: EF (Steigung)=1,5, KH (Parallelverschiebung)=5, $TV_{\text{max}}=76 \text{ °C}$, $TV_{\text{min}}=20 \text{ °C}$, $TV_{\text{abs}}=0\text{K}$

Identifizierte Fehler, Auswertungen, Korrekturmaßnahmen

- Der Wärmemengezähler dieses Heizkreises ist Mitte Jan 2016 ausgefallen und Leistungswerte wurden bei 100 kW (außer im Zeitraum zwischen November und Mitte Dezember 2016) abgeschnitten. Nach Prüfung des Wärmemengezählers wurde das Analog-Modul am 30.11.2016 gewechselt.
- Die Schwellenwerte des Außentemperaturmittelwertes für die Freigabe der Heizkreise Statische Heizung und Fußbodentemperierung waren nicht konsistent (10 °C vs 15 °C)
- Der Heizkreis wurde im Sommer 2015 nachts und morgens bis ca. 8h00 betrieben, obwohl keine Wärmeentnahme gemessen wurde. Ab Sommer 2016 ist dieses Verhalten nicht mehr zu beobachten (siehe Abbildung 9.11-23).
- Anhand der verfügbaren Daten scheint der Heizkreis ab Mai ausgeschaltet zu sein und wieder ab September in Betrieb zu gehen. Bemerkenswert ist, dass keine Messdaten für den Anfang der Heizsaison 2017/2018 vorliegen. Der Wärmemengezähler sollte überprüft werden (siehe Abbildung 9.11-23).
- Es wurden Nutzungszeiten von Mo: 2-21 Uhr, Di-Fr: 5h20 – 21 Uhr und Sa: 6–18 Uhr identifiziert. Diese wurden Anfang 2017 durch neue Nutzungszeiten Mo: 2-20 Uhr, Di – Fr.: 5:30 – 20 Uhr geändert.
- Nach Abbildungen 9.11-24 und 9.11-25 ist keine deutliche Wochenendabsenkung in 2015 und vor allem in 2016 erkennbar. Ab 2017 ist diese deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 9.11-26). Eine Nachtabsenkung von -10K wurde Ende 2016 programmiert.
- Die Messung der Vorlauftemperatur liegt nicht vor. Diese wurde anhand der gemessenen thermischen Leistung, der Rücklauftemperatur und des Massenstroms gerechnet. Sie liegt in einem Bereich zwischen 66 °C und 70 °C mit einer Spreizung zwischen 23 und 27 Kelvin (siehe Abbildungen 9.11-28, 9.11-29 und 9.11-30).
- Es wurde festgestellt, dass der Stand-by Modus des Heizkreises den gleichen Sollwert von 10 °C für den Tages- und den Nachtsbetrieb aufwies. Mit dem Stand-by Modus wird die Heizungsanlage in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur ein- und ausgeschaltet. Mit dem Ausschalten des Heizkreises werden auch die Umwälzpumpen abgeschaltet. Im Bedarfsfall wird der Heizkreis wieder eingeschaltet. Seit Anfang 2017 wurden ein Standby-Betrieb am Tag ab 18 °C und ein Standby-Betrieb in der Nacht ab 16 °C mit einer Hysterese von 1K aktiviert.

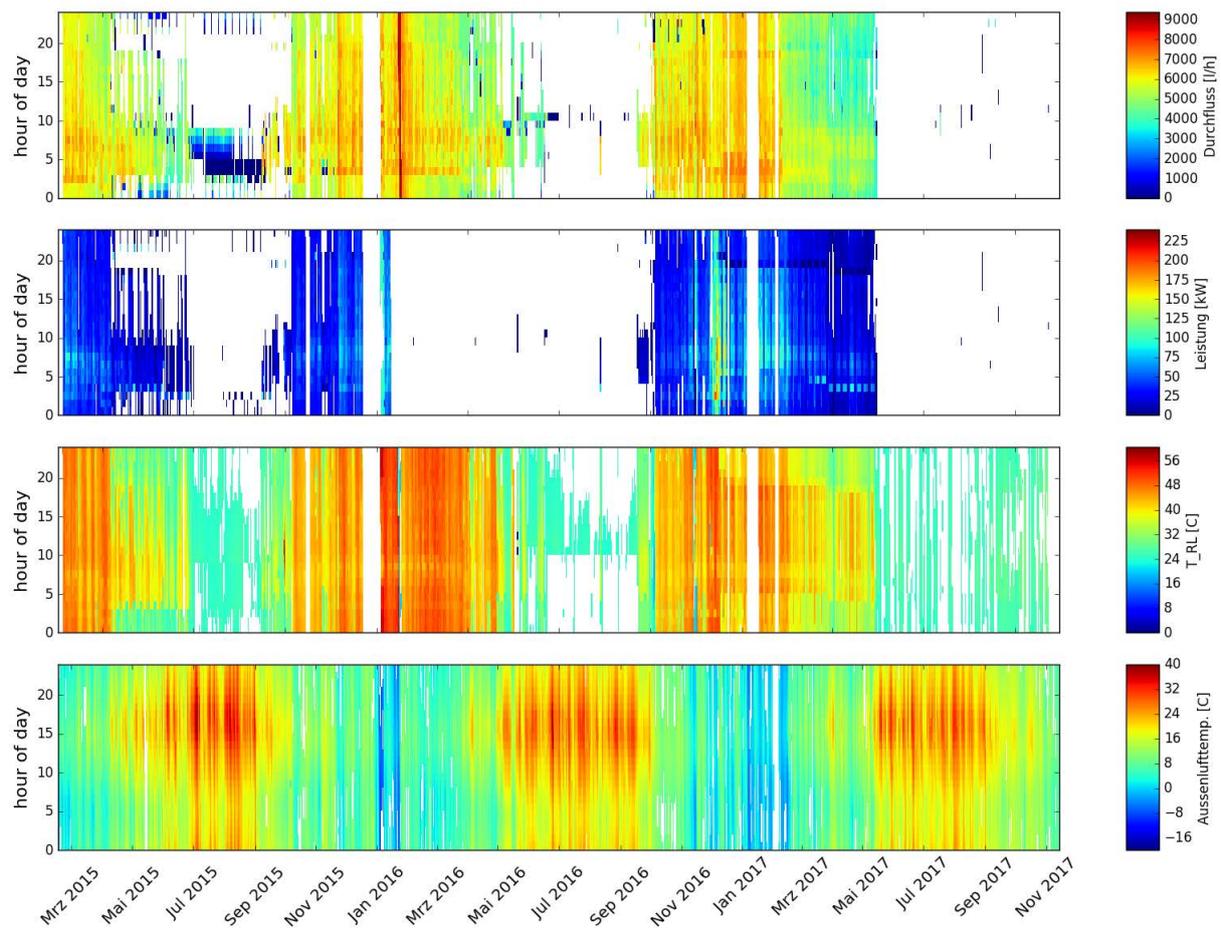


Abbildung 9.11-23: Heizkreis statische Heizung (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Rücklauftemperatur (T_{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

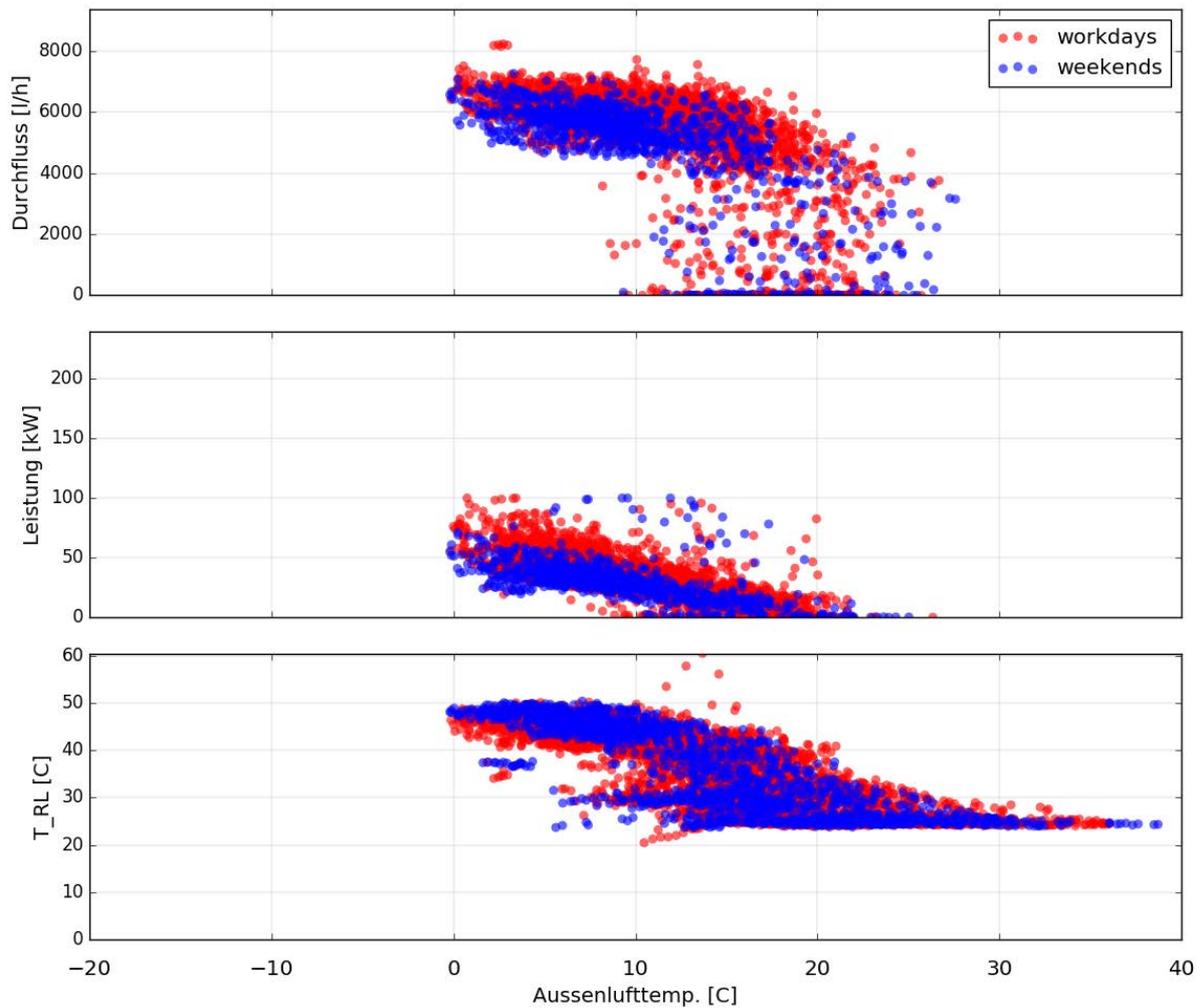


Abbildung 9.11-24: Heizkreis statische Heizung 2015 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

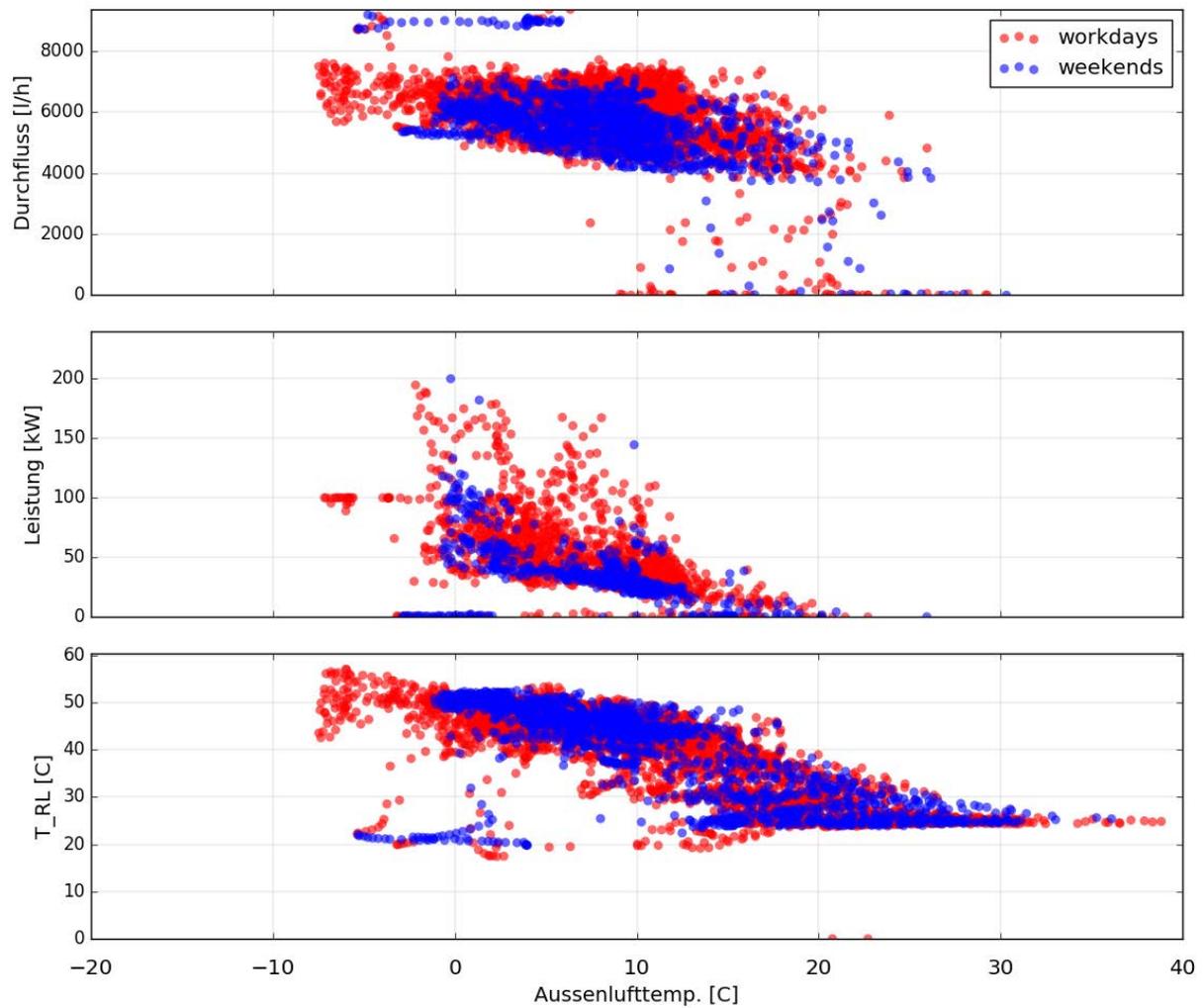


Abbildung 9.11-25: Heizkreis statische Heizung 2016 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

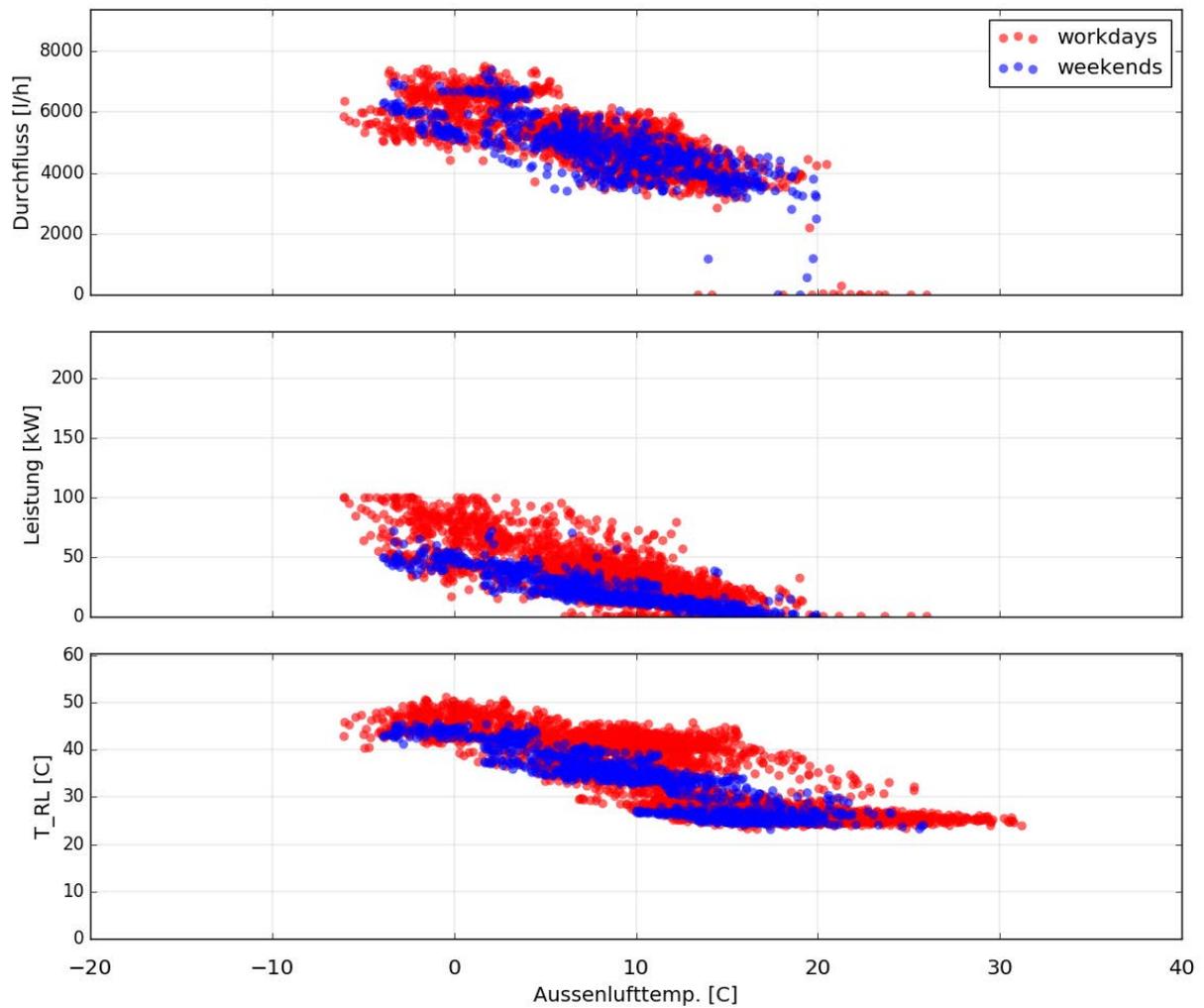


Abbildung 9.11-26: Heizkreis statische Heizung 2017 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

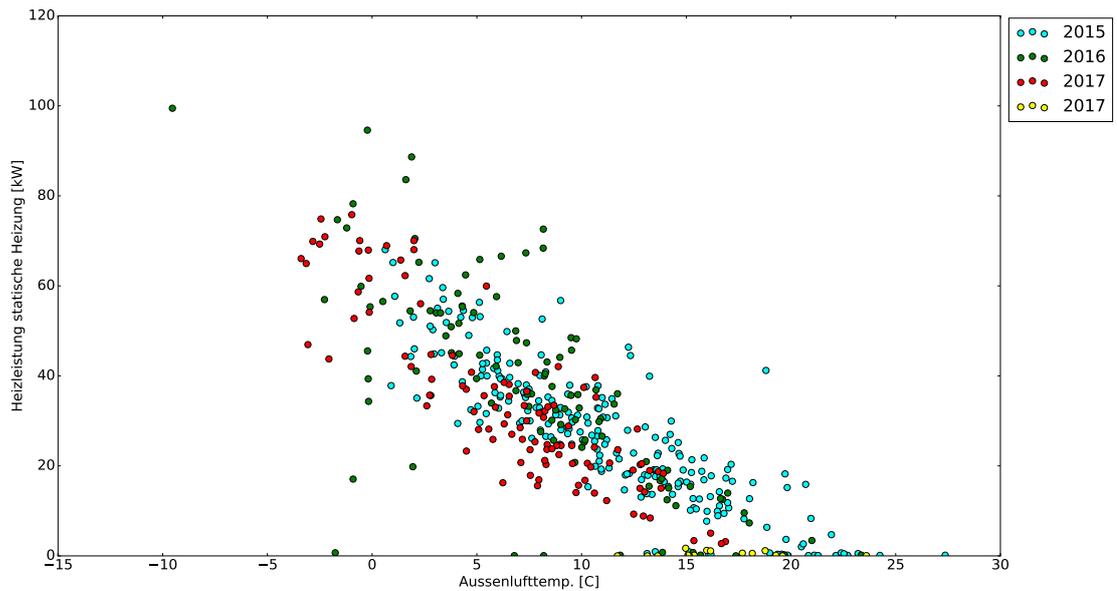


Abbildung 9.11-27: Heizleistung statische Heizung - Tagesmittelwert (@ Fraunhofer ISE)

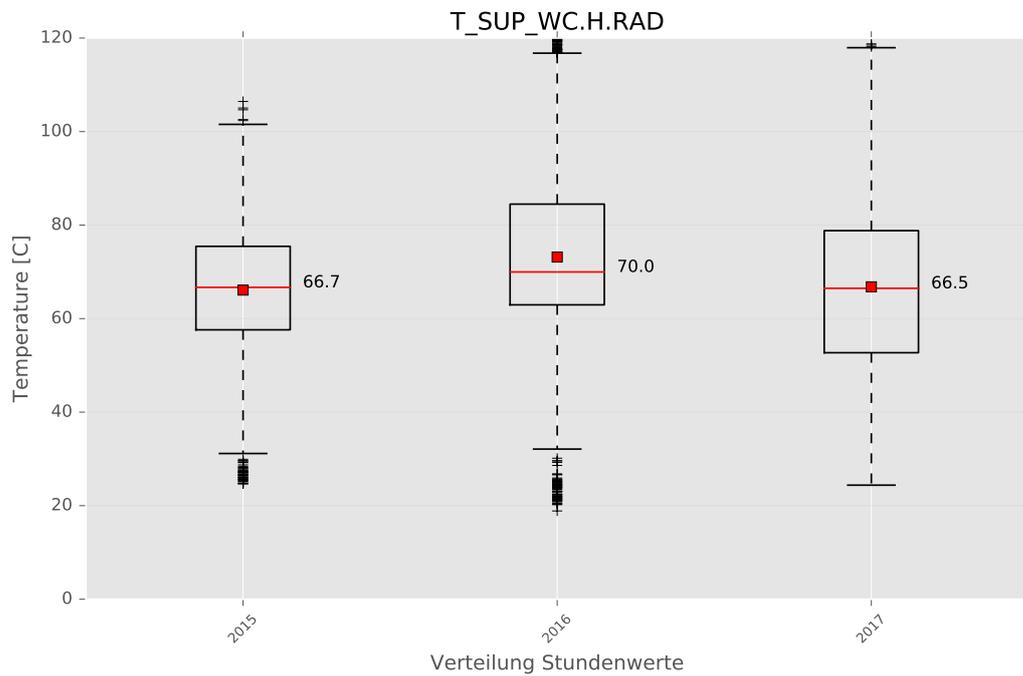


Abbildung 9.11-28: Heizkreis statische Heizung - Verteilung der Vorlauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

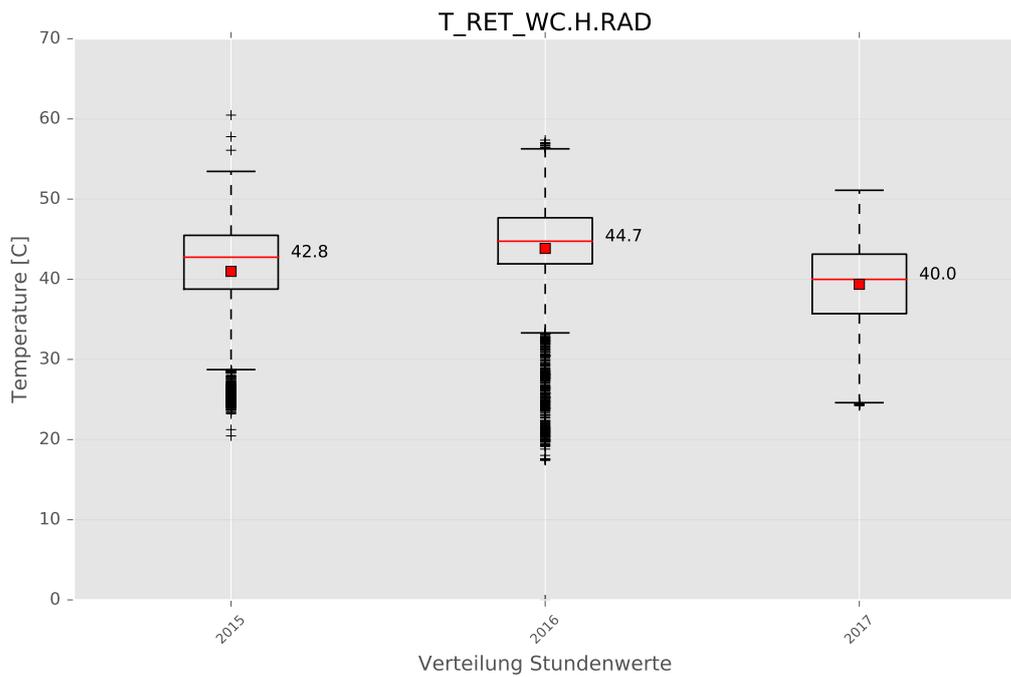


Abbildung 9.11-29: Heizkreis statische Heizung - Verteilung der Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

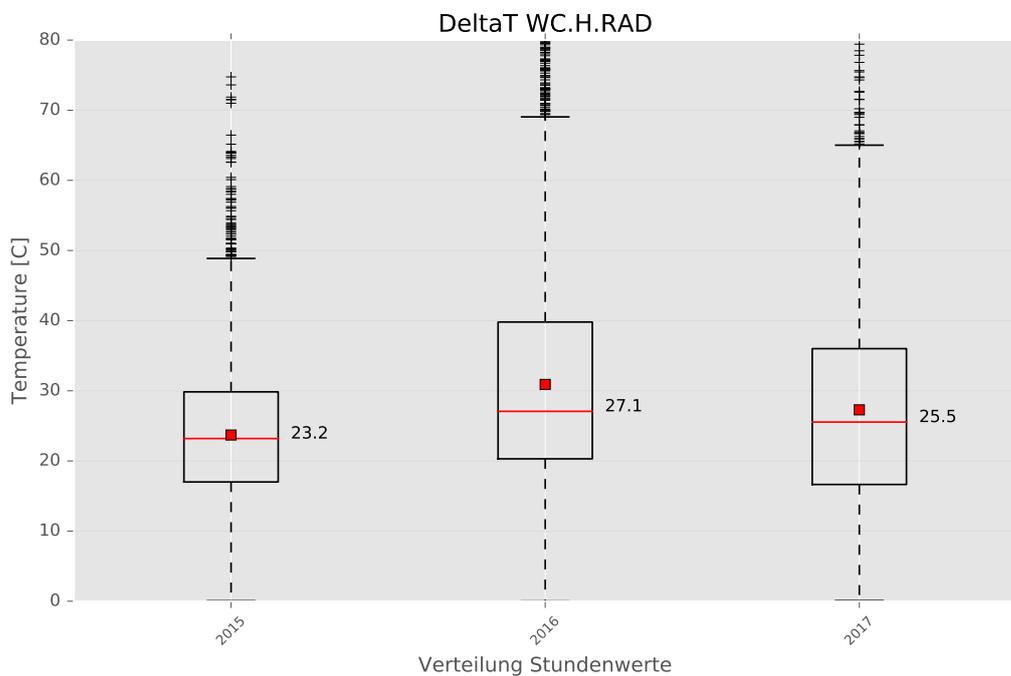


Abbildung 9.11-30: Heizkreis statische Heizung - Verteilung der Temperaturspreizung (@ Fraunhofer ISE)

Kühlkreis Umluftkühlgeräte

Funktion

Der Kühlkreis Umluftkühlgeräte wird über eine Beimischschaltung mit Kaltwasser 6/12°C primärseitig und 16/18° C sekundärseitig mittels einer drehzahlgeregelten Umwälzpumpe ($V=15.5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 7.0 \text{ mWs}$) versorgt.

Identifizierte Fehler, Auswertungen, Korrekturmaßnahmen

- Bei einer ersten Untersuchung wurde festgestellt, dass die Vor- und Rücklauftemperaturen der Kältemengenzähler in der Gebäudeautomation vertauscht wurden. Die Datenpunktlisten wurden aus Konsistenzgründen nicht verändert. Dies wurde in weiteren Analysen berücksichtigt.
- Der Kühlkreis ist während des gesamten Zeitraums in Betrieb. Dies begründet sich damit, dass er auch Serverräume versorgt.
- Die Verteilungswerte der Temperaturspreizung zeigen, dass die Vorlauftemperatur auf einen Medianwert von 16.3°C geregelt wird und dass die Rücklauftemperatur sich auf Medianwerte zwischen 16.8°C und 17.2°C einstellt. (siehe Abbildungen 9.11-33 und 9.11-34). Der Medianwert der Temperaturspreizung liegt dabei zwischen -0.7 K und -0.9 K über den Betrachtungszeitraum (siehe Abbildung 9.11-20). Der Kühlkreis wird während einer signifikanten Anzahl an Betriebsstunden mit einer sehr niedrigen Spreizung betrieben. Dies führt zu einem höheren Hilfsenergieverbrauch der Pumpe und einer reduzierten Effizienz bei der Kälteerzeugung. Wir empfehlen eine mögliche Überdimensionierung sowie die Regelungseinstellungen der Pumpe zu prüfen .

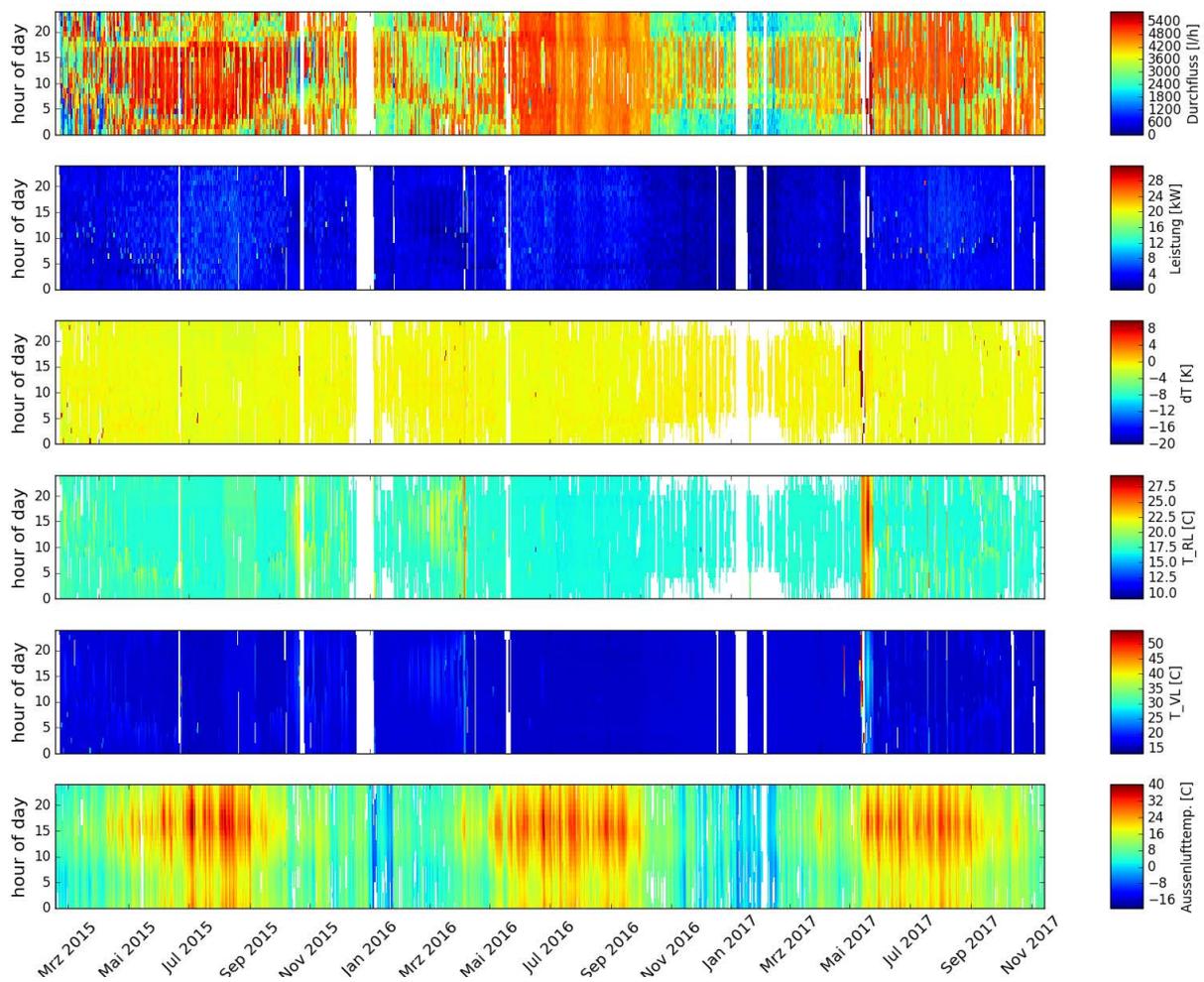


Abbildung 9.11-31: Kühlkreis Umluftkühlgeräte (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), Rücklauftemperatur (T_RL), Temperaturspreizung (dT), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

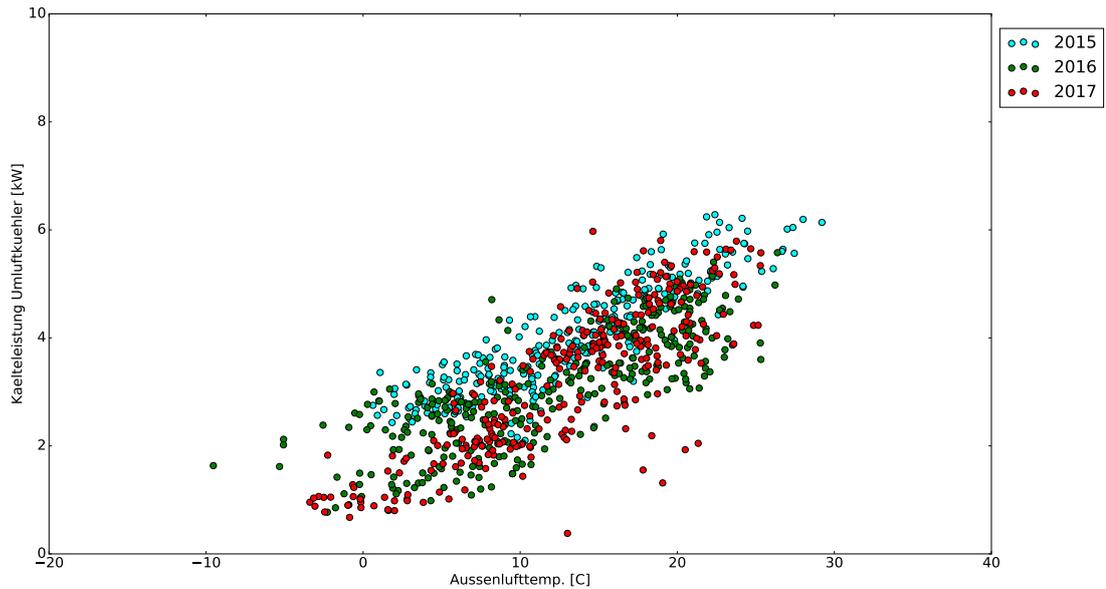


Abbildung 9.11-32: Kälteleistung Umluftkühlgeräte - Tagesmittelwert - Gelb: ab IBN neuer Kältemaschine (@ Fraunhofer ISE)

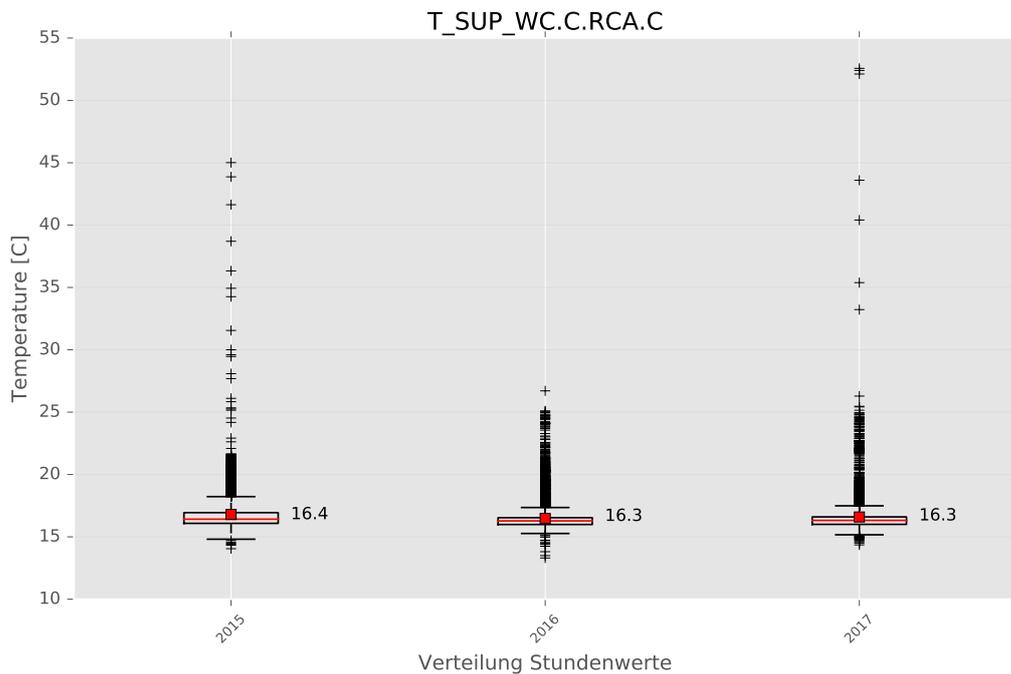


Abbildung 9.11-33: Kühlkreis Umluftkühlgeräte - Verteilung der Vorlauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

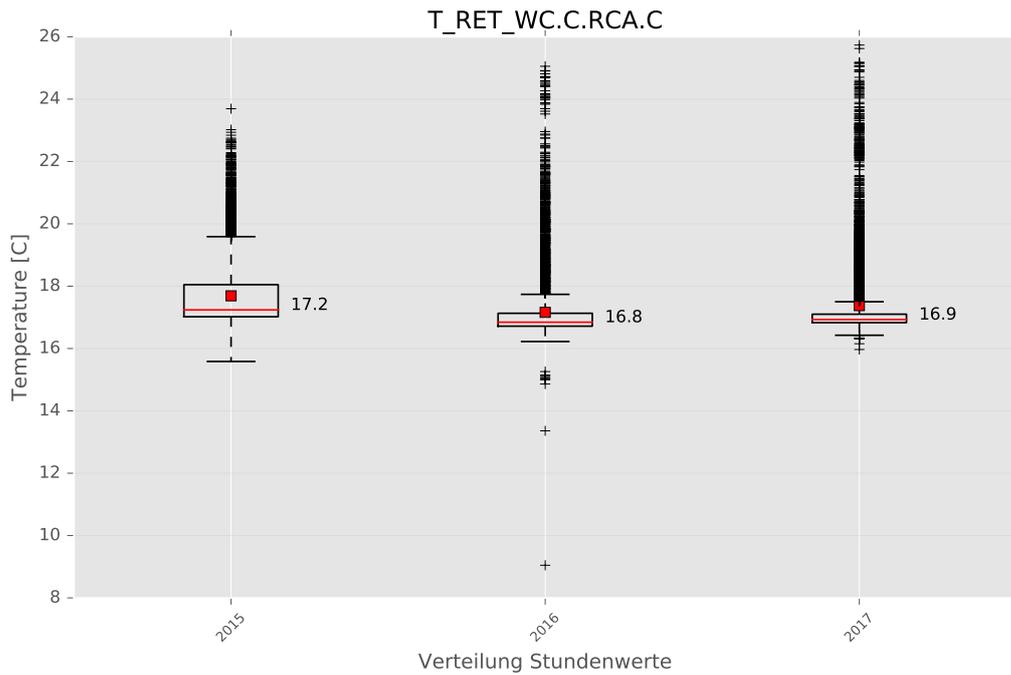


Abbildung 9.11-34: Kühlkreis Umluftkühlgeräte - Verteilung der Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

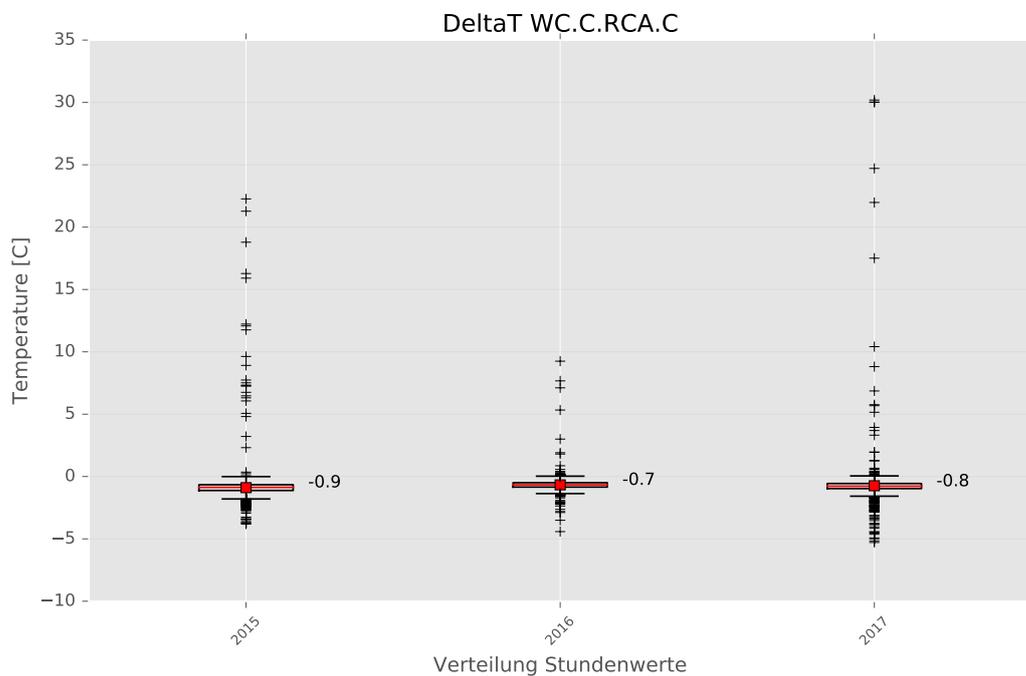


Abbildung 9.11-35: Kühlkreis Umluftkühlgeräte - Verteilung der Temperaturspreizung (@ Fraunhofer ISE)

Heiz- und Kühlkreis Fußbodentemperierung

Funktion

Die Fußbodentemperierung hat im Heizbetrieb eine thermische Nennleistung von 52 kW und wird über einen zwischengeschalteten Plattenwärmetauscher und eine Beimischschaltung mit Warmwasser 45/35°C mittels einer drehzahlgeregelten Umwälzpumpe ($V=4,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 5,7 \text{ mWs}$) versorgt. Der Heizkreis wird bei Unterschreitung einer Tagesmitteltemperatur von 15°C freigegeben. Im Heizbetrieb ist die Vorlauftemperatur der Fußbodentemperierung nach der Außenlufttemperatur geführt. Die Heizkennlinie ist wie folgt eingestellt: Steigung $EF=0.0$, Parallelverschiebung $Kh=5K$. Der Heizkreis wird bei Unterschreitung eines Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur von 15°C freigegeben. Tagsüber sind Standby-Werte der Raumtemperaturen von 15°C und Nachts von 12°C programmiert. Folgende Nutzungszeiten sind programmiert: Mo – Do: 0-24, Fr.: 0 – 19 Uhr, Sa: keine, So: 13-24 Uhr.

Die Fußbodentemperierung wird auch zur Kühlung der Zone genutzt. Der Kühlbetrieb wird ab Überschreitung eines Tagesmittelwerts der Außenlufttemperatur von 16°C freigegeben. Der Sollwert der Vorlauftemperatur liegt konstant bei 19°C. Für diese Betriebsweise ist jedoch kein Wärmemengezähler installiert und deshalb liegen keine Messwerte vor.

Identifizierte Fehler, Auswertungen, Korrekturmaßnahmen

- Es wurde festgestellt, dass das Totband zwischen Heiz- und Kühlbetrieb von 1K zu gering war und dass keine zeitliche Verzögerung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb programmiert wurde.
- Anhand von Abbildung 9.11-36 ist am Durchfluss und thermische Leistung erkennbar, dass der Heizkreis im Sommer 2015 und vor allem im Sommer 2017 in Betrieb war. Im Sommer 2016 war dieses Verhalten nicht zu beobachten.

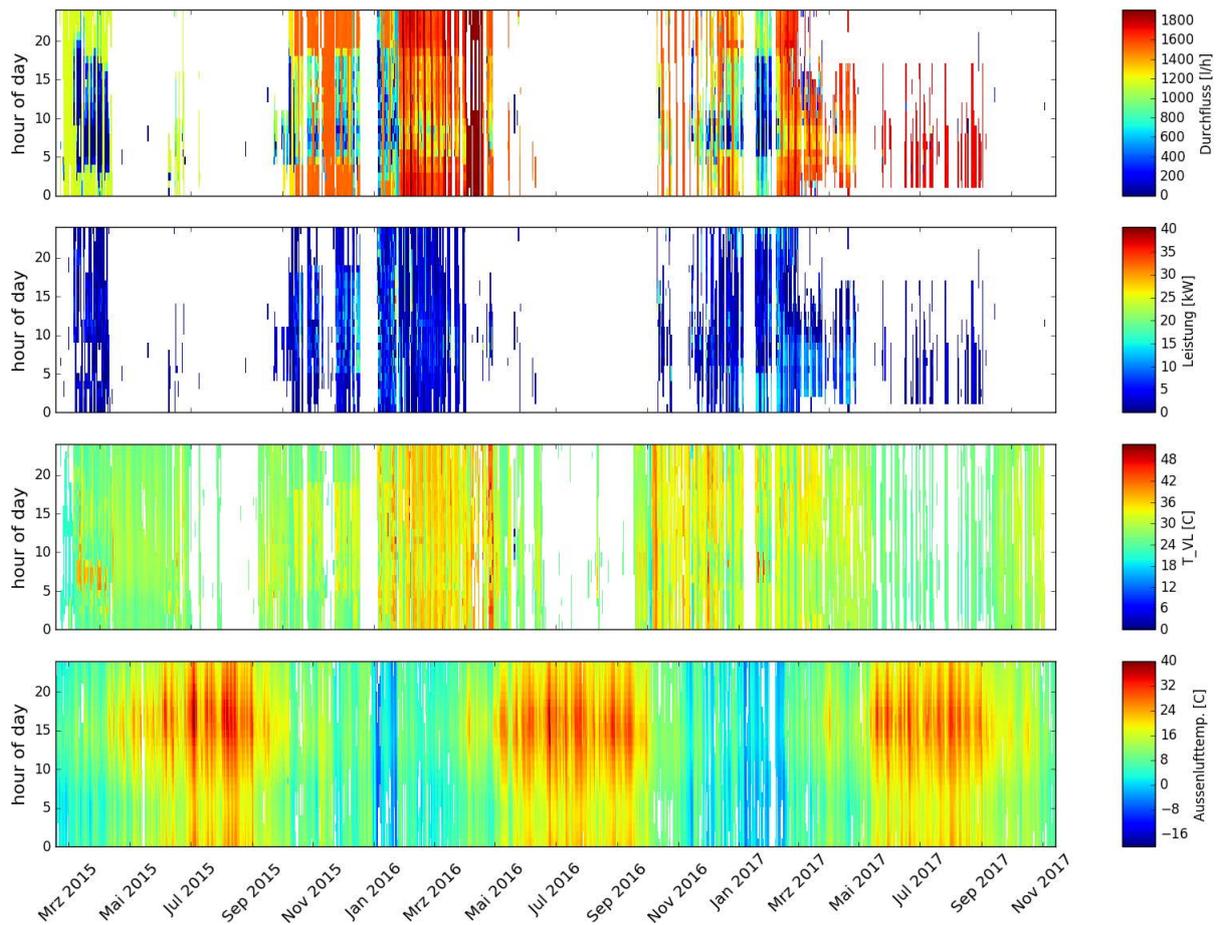


Abbildung 9.11-36: Heizkreis Fußbodentemperierung (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

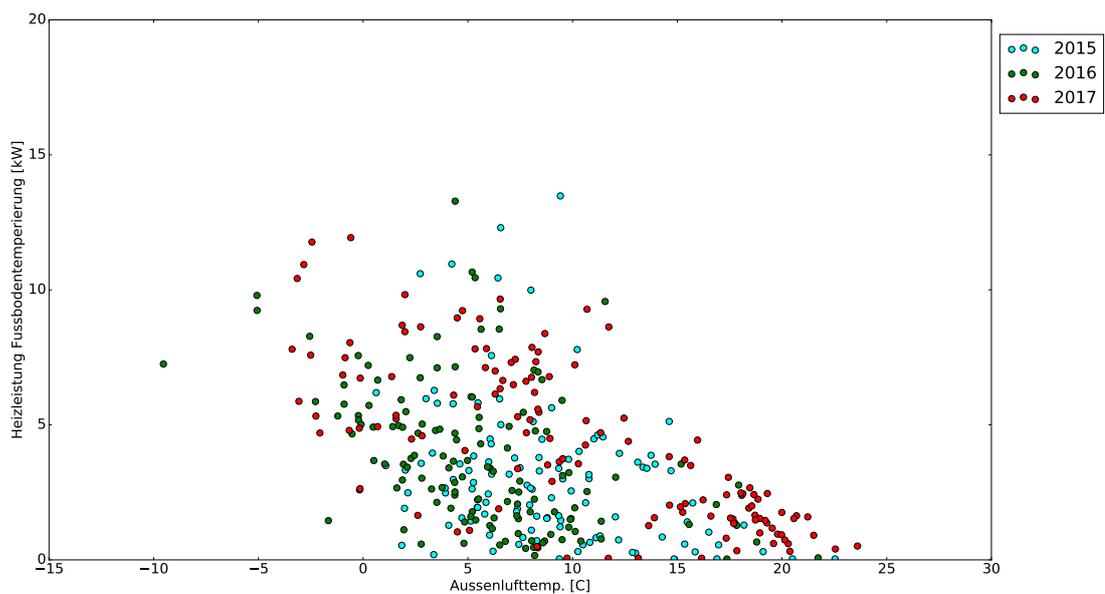


Abbildung 9.11-37: Heizleistung Fußbodentemperierung - Tagesmittelwert (@ Fraunhofer ISE)

Heizkreis RLT 03

Funktion

Die Luftherhitzer der RLT-Anlagen RLT02 und RLT03 weisen thermische Nennleistungen von 111 kW und 148 kW auf und werden über einen Plattenwärmetauscher mit Warmwasser 70/45°C mittels einer Umwälzpumpe versorgt. Laut dem Schema verfügt jeder Luftherhitzer über eine Beimischschaltung und einen eigenen Wärmemengenzähler. Vorhanden sind aber nur Messdaten aus einem einzigen Wärmemengenzähler »WMZ3 RLT Anlage«, welcher der RLT 03 zugeordnet wird.

Identifizierte Fehler, Auswertungen, Korrekturmaßnahmen

- Der Wärmemengezähler (WMZ03) des RLT-Heizkreises war defekt und das Analog-Modul wurde am 30.11.2016 gewechselt.
- In der Programmierung der Gebäudeautomation wurde eine Überlappung der Heiz- und Kühlsequenzen mit einem negativen Totband von -0.5K berücksichtigt.
- Zahlreiche Sollwertveränderungen in der Gebäudeautomation wurden identifiziert.
- Anhand von Abbildung 9.11-38 ist erkennbar, dass alle Messgrößen ein deutliches Wochenmuster zeigen. Auffallend sind die höheren Werte des Durchflusses an Wochenenden und nachts bei nur sehr geringer Leistungsabnahme. Zufolge ergeben sich ein unnötiger Pumenstromverbrauch sowie eine Rücklaufanhebung. Der Heizkreis war 2015 und 2016 von Juli bis September nicht in Betrieb. Im Sommer 2017 war er nur an einzelnen Tagen in Betrieb.
- Folgende Nutzungszeiten: Mo: 03 – 20 Uhr, Die – Fr.: 4 – 20 Uhr, Sa u. So: 9:45 – 10 Uhr wurden auf Basis einer Methode zur automatischen Zeitplanerkennung identifiziert. Die Anlage wird morgens sehr früh eingeschaltet und an Sa-So nur während 15 min betrieben. Anfang 2017 wurden folgende Nutzungszeiten programmiert: RLT03: Mo – Fr: 6:35 – 19:00 Uhr; RLT02: Mo – Fr: 6:40 – 19:00 Uhr. Weiterhin wurden saisonale Zeitpunkte für die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb geplant für die Sommer-Winter-Umschaltung geplant.
- Standbywerte für den Tagesbetrieb wurden von 16°C auf 18°C angehoben, und für den Nachtbetrieb von 10°C auf 12°C. Weiterhin wurden Jahresdatenpunkte für die Sommer-Winter-Umschaltung aus Anfrage des Betreibers programmiert. Bei diesen Parametern wird der Heizkreis ab einem festgelegten Datum freigegeben bzw. gesperrt.
- Die Verteilungswerte der Temperaturspreizung zeigen, dass die Vorlauftemperatur auf einen Medianwert zwischen 38.6°C und 40.9°C geregelt wird und dass die Rücklauftemperatur sich auf Medianwerte zwischen 33.9°C und 34.6°C einstellt. (siehe Abbildungen 9.11-39 und 9.11-40). Der Medianwert der Temperaturspreizung liegt dabei zwischen 1.7 K und 2.5 K über den Betrachtungszeitraum (siehe Abbildung 9.11-41). Der Heizkreis wird während einer signifikanten Anzahl an Betriebsstunden mit einer sehr niedrigen Spreizung betrieben. Dies führt zu einem höheren Hilfsenergieverbrauch der Pumpe. Es wird empfohlen eine mögliche Überdimensionierung sowie die Regelungseinstellungen der Pumpe zu prüfen.

- In Abbildungen 9.11-42 und 9.11-43 ist erkennbar, dass der Heizkreis der RLT-Anlage 03 teilweise an Wochenenden und Feiertagen betrieben wurde. 2017 (siehe Abbildung 9.11-44) sind deutlich weniger Ausreißer an Wochenenden vorhanden. Jedoch zeigen die Messungen, dass die Pumpe mit einem nahezu konstanten Durchfluss über den gesamten Betrachtungszeitraum an Wochenenden betrieben wird, obwohl keine Wärme abgenommen wird. Dies soll noch durch Anpassung der Freigabeeinstellung der Pumpe behoben werden.

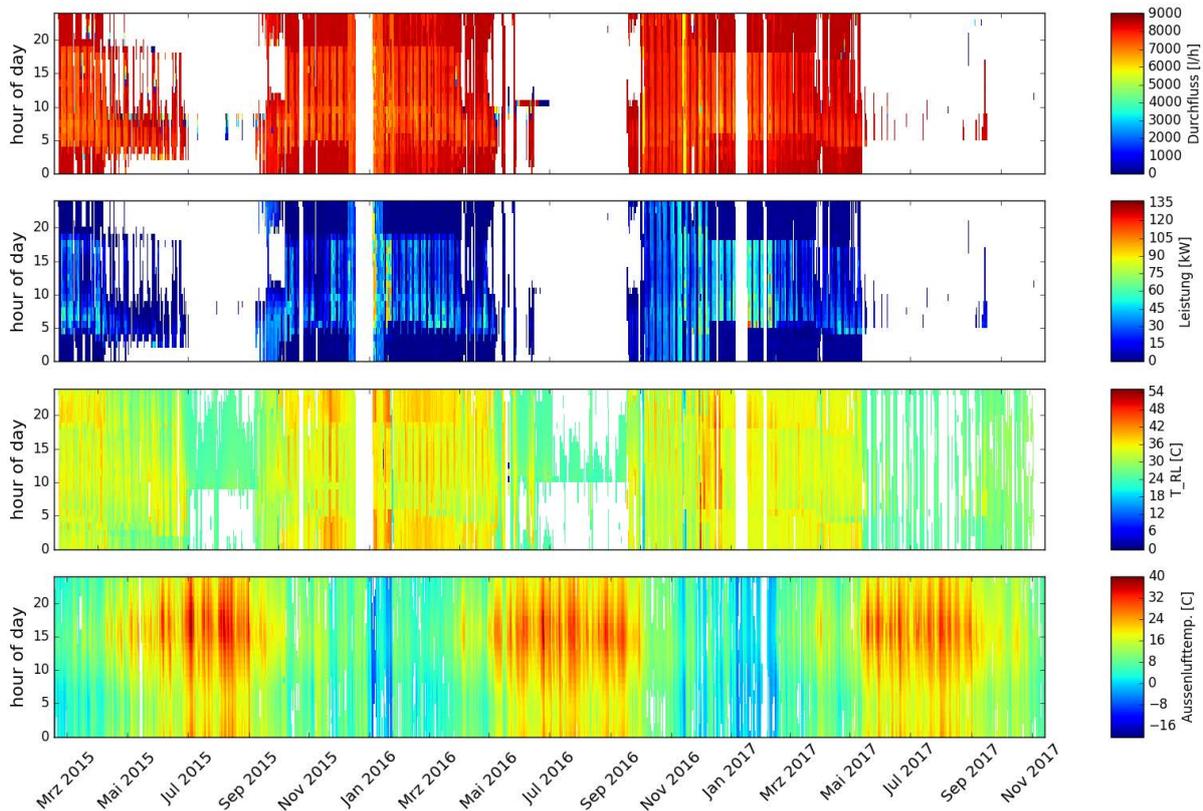


Abbildung 9.11-38: Heizkreis RLT-Anlage 03 (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur (T_VL), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

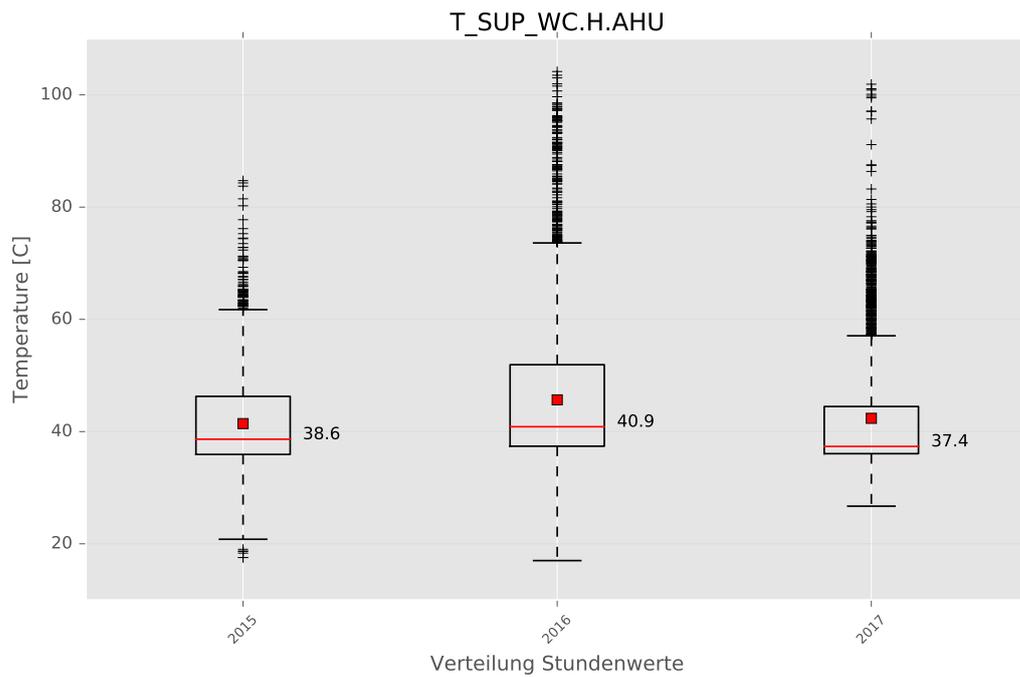


Abbildung 9.11-39: Heizkreis RLT-Anlage 03 - Verteilung der Vorlauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

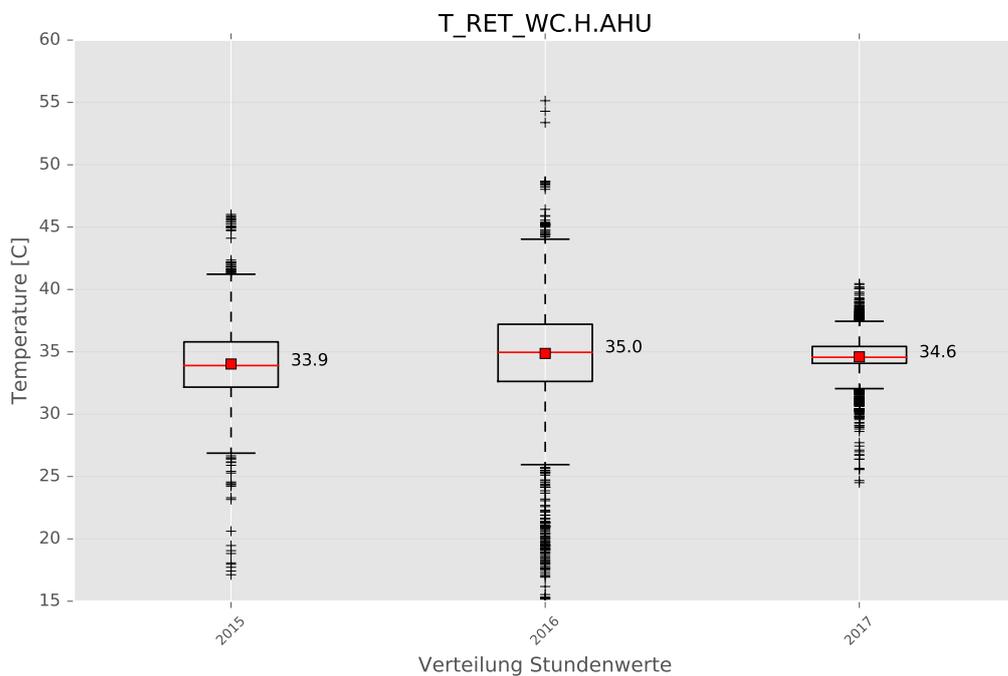


Abbildung 9.11-40: Heizkreis RLT-Anlage 03 - Verteilung der Rücklauftemperatur (@ Fraunhofer ISE)

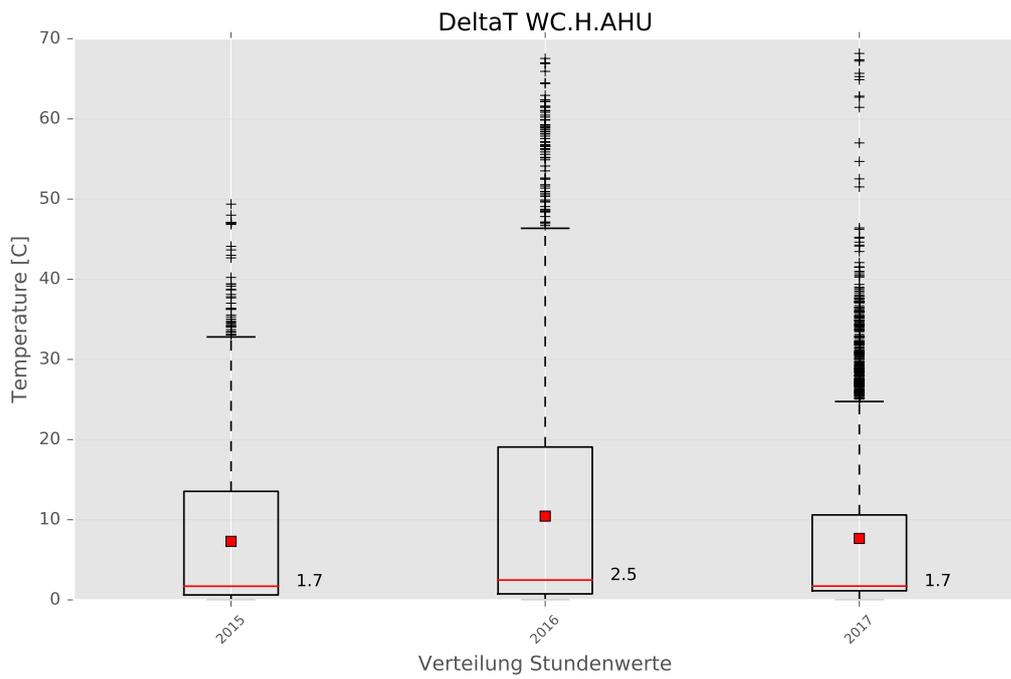


Abbildung 9.11-41: Heizkreis RLT-Anlage 03 - Verteilung der Temperaturspreizung (@ Fraunhofer ISE)

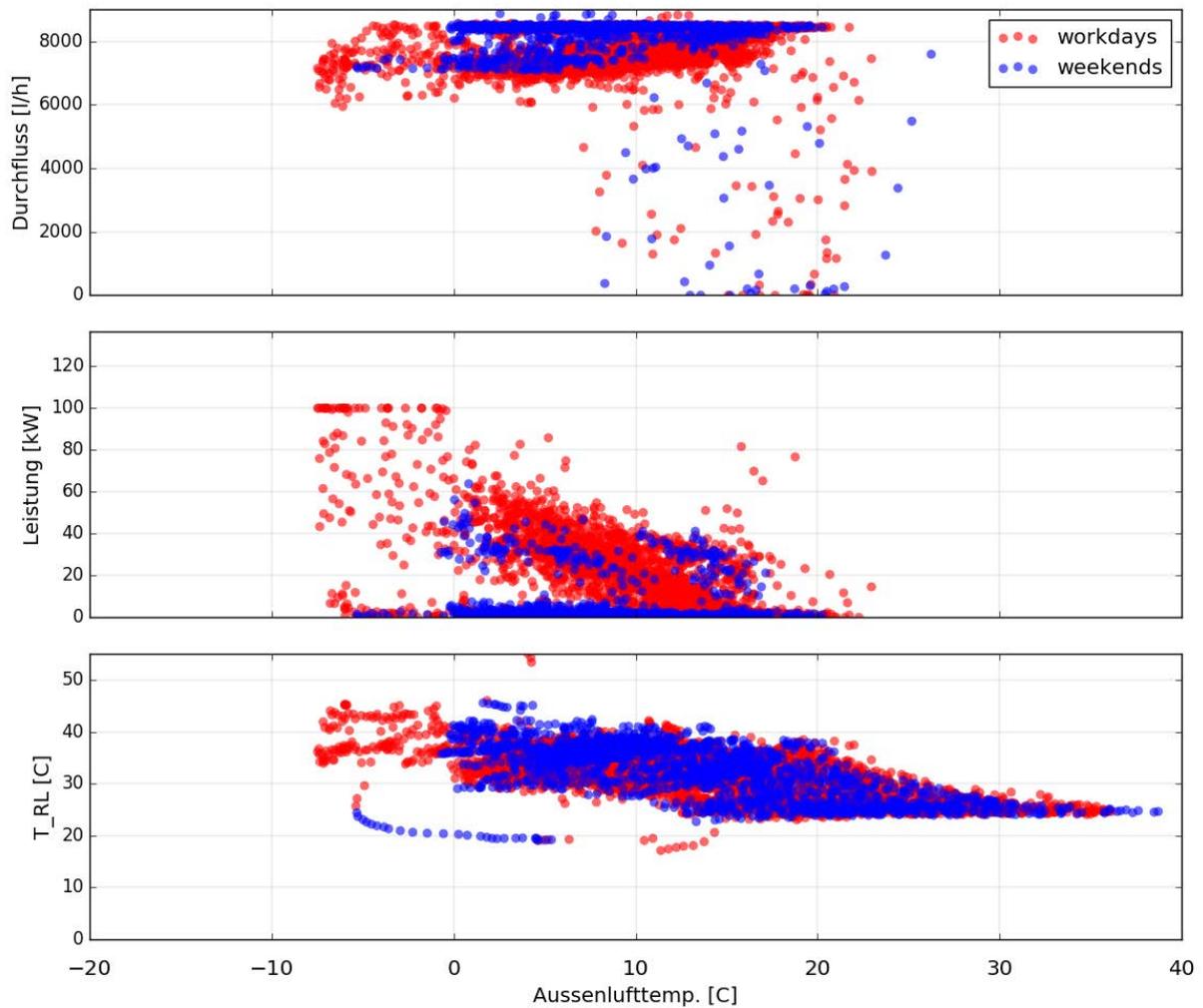


Abbildung 9.11-42: Heizkreis RLT-Anlage 03 Jahr: 2015 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

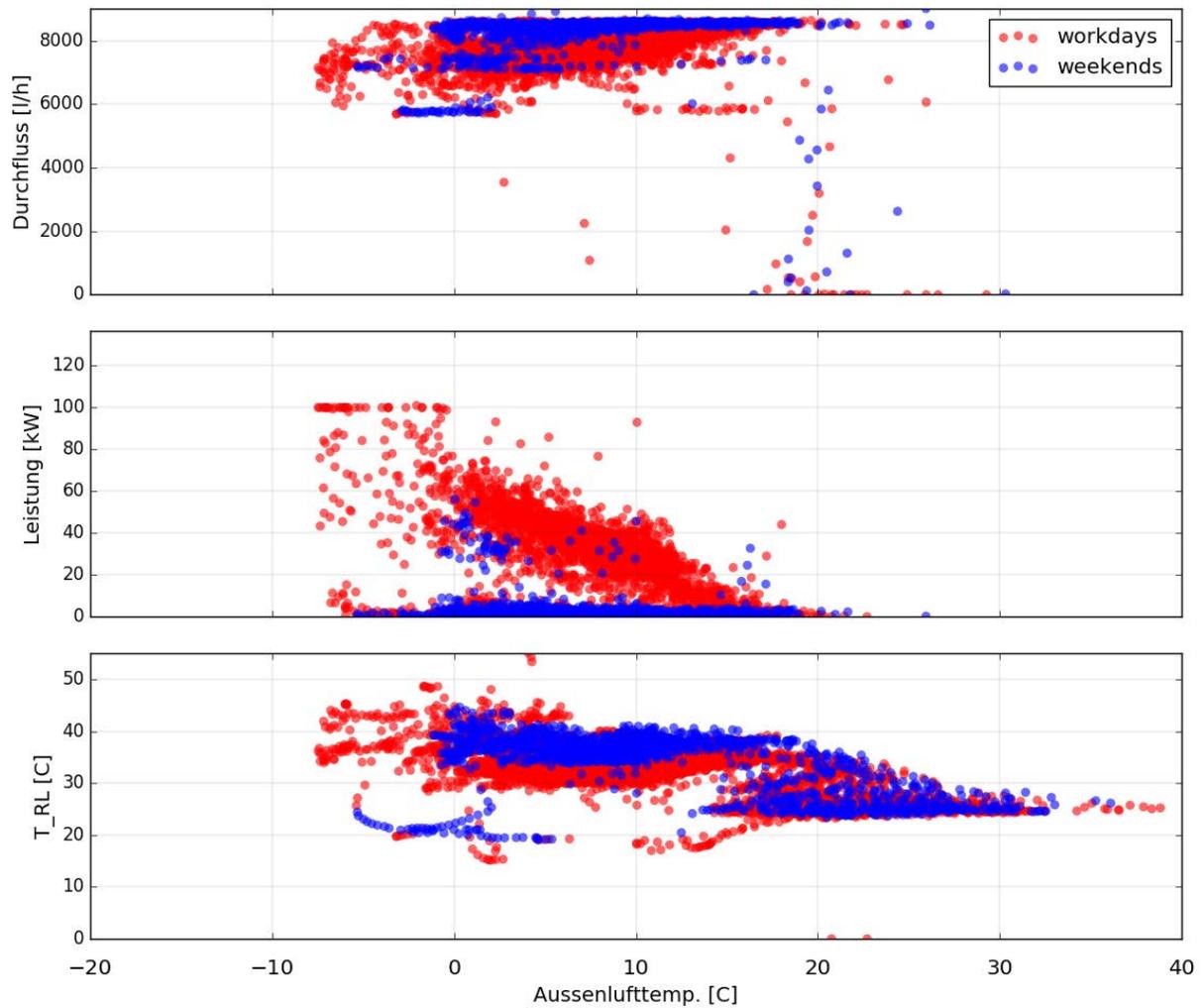


Abbildung 9.11-43: Heizkreis RLT-Anlage 03 Jahr: 2016 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

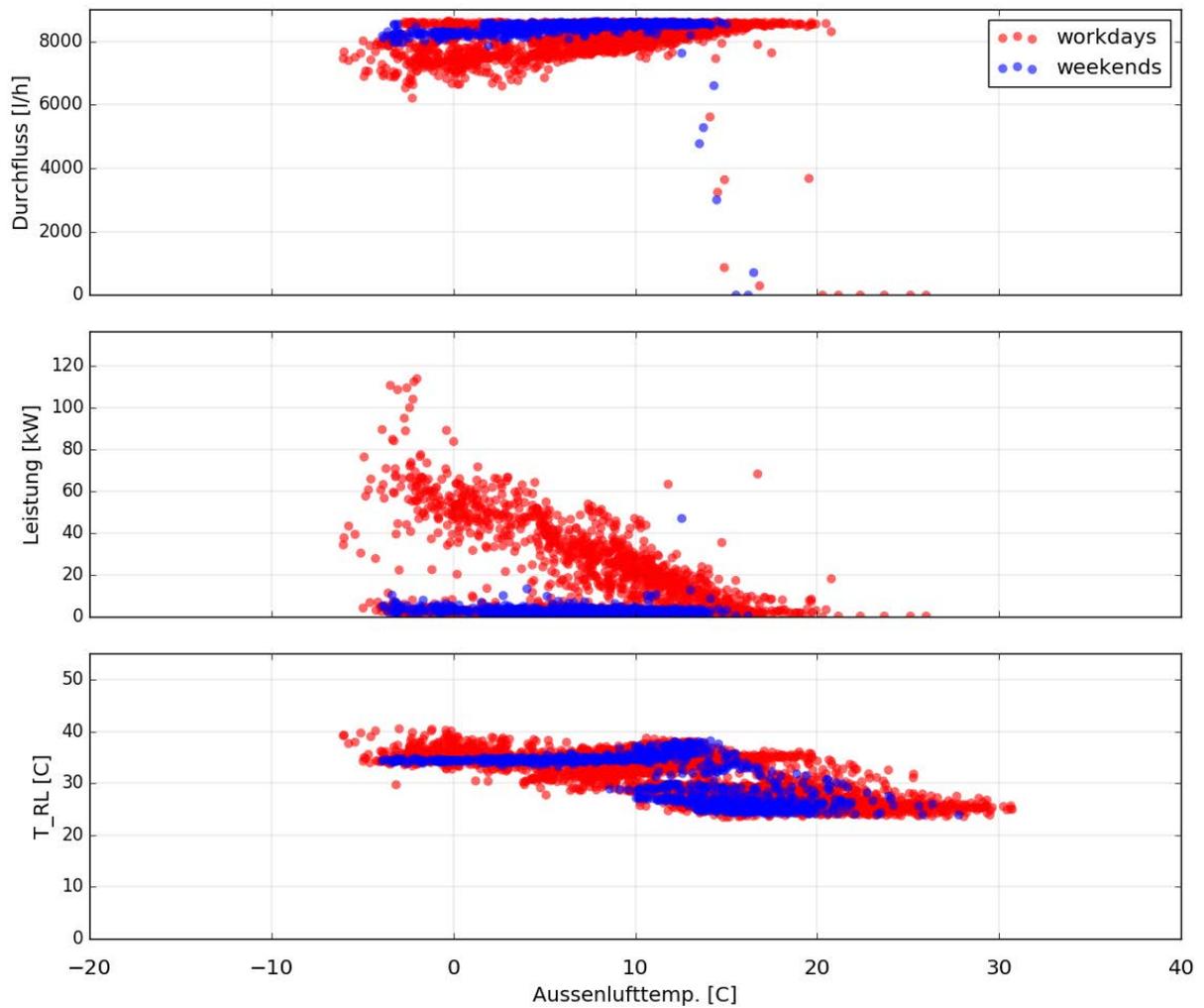


Abbildung 9.11-44: Heizkreis RLT-Anlage 03 Jahr: 2017 - Stundenwerte - Von unten nach oben: Rücklauftemperatur (T_{RL}), thermische Leistung, Durchfluss (@ Fraunhofer ISE)

9.11.2.5 Lüftungsanlagen (ISE)

Funktion

Vorhanden sind Daten aus zwei Stromzählern, die die elektrische Leistungsaufnahme der RLT03 und der zusammengefassten RLT02 und RLT04 erfassen.

- RLT 01: Lüftungsanlage Lager
- RLT 02 und RLT 04: Zuluftanlage mit 12.520 m³/h - Wärmerückgewinnung als Kreislaufverbundsystem, Luftherhitzer, Luftkühler bzw. Abluftanlage Atrium mit 21.500 m³/h

Lüftungsanlage RLT01

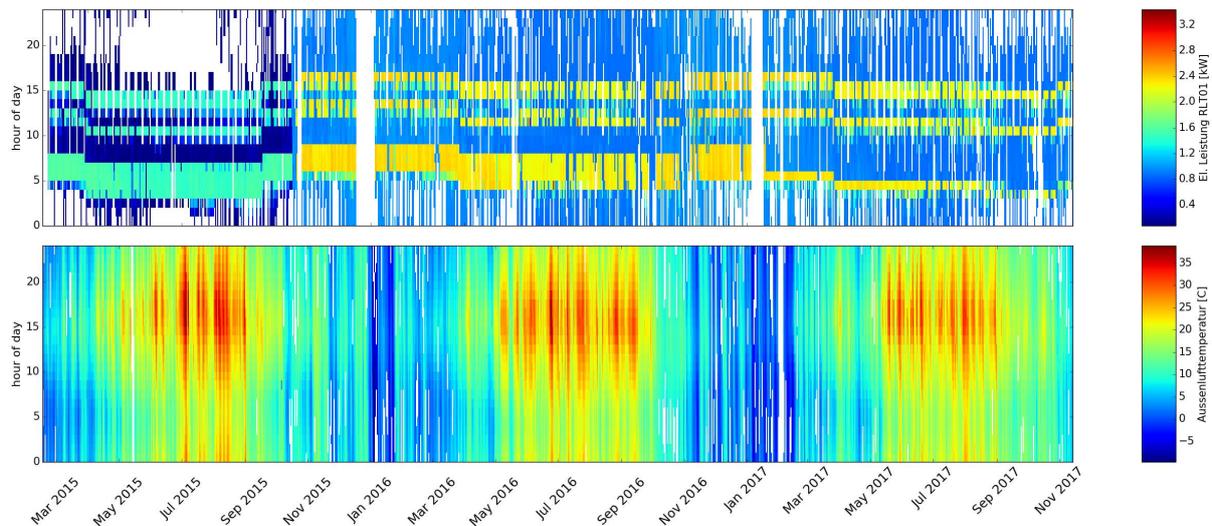


Abbildung 9.11-45: Heizkreis RLT-Anlage 01 (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, elektrische Leistung (@ Fraunhofer ISE)

Lüftungsanlagen RLT03/RLT04

- Die Abbildungen 9.11-46 und 9.11-47 zeigen einen durchgängigen Betrieb der Lüftungsanlagen im Zeitraum bis Juni 2017. Nachts und an Wochenenden laufen die Anlagen zeitweise auf einer reduzierten Leistungsstufe. Während manchen Zeiträumen (Juli bis Okt 2015, Sommer 2016, Mai 2017) laufen die Anlagen durchgängig auf einer hohen Leistungsstufe.
- Ab Mitte Juni 2017 werden die Anlagen ab nachts zwischen 0h00 und 03h00 eingeschaltet und um 16h00 ausgeschaltet. An Wochenenden sind die Anlagen aus.

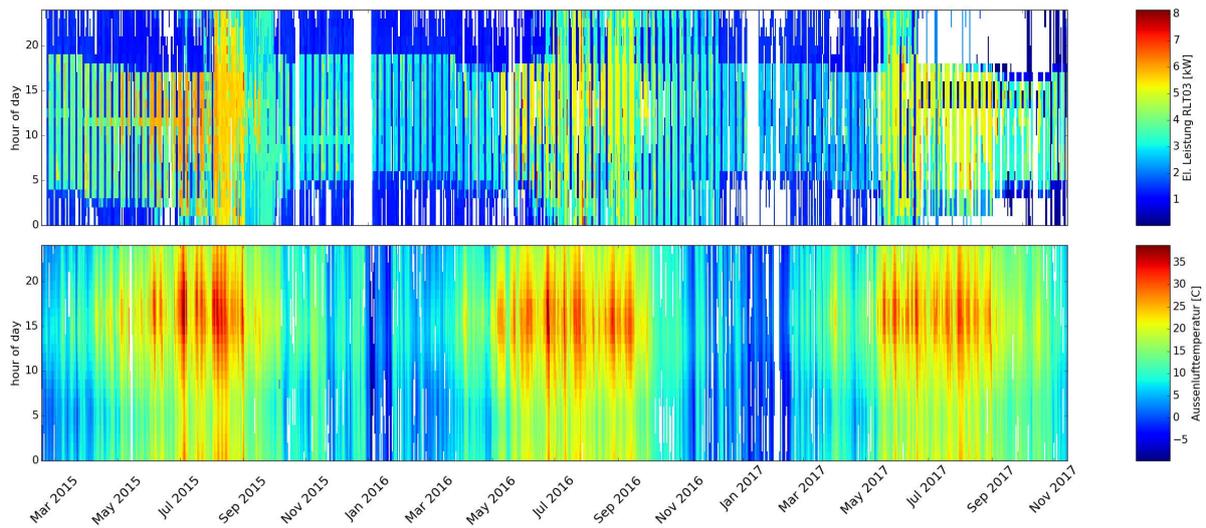


Abbildung 9.11-46: RLT-Anlage 03 (Carpetplot) Von unten nach oben: Außenlufttemperatur, elektrische Leistung (@ Fraunhofer ISE)

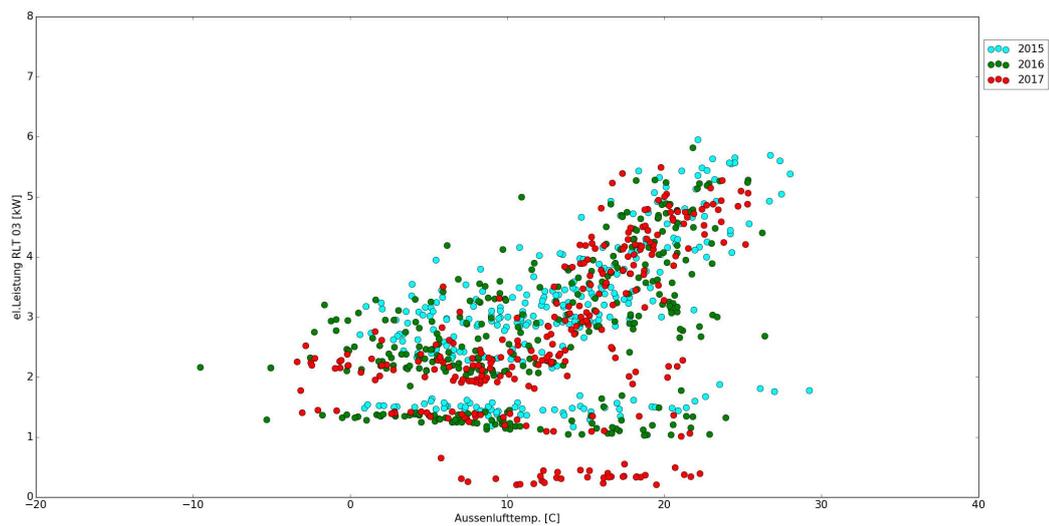


Abbildung 9.11-47: Elektrische Leistungsaufnahme RLT03 2015-2017 - Tagesmittelwerte (@ Fraunhofer ISE)

9.12 Umsetzung von Maßnahmen

Die im Rahmen des Forschungsprojektes ModQS von PLENUM aufgebaute und in den Funktionen erweiterte Software für ein Anlagenmonitoring wurde während der Laufzeit von OBSERVE weiterentwickelt und im Betrieb optimiert. In Abhängigkeit vom Umfang der erfassten Datenpunkte ist es auf diese Weise möglich, zeitnah Fehler im Anlagenbetrieb zu erkennen, einzugrenzen und im günstigen Fall auch direkt Vorschläge für deren Beseitigung abzugeben.

Bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung und zur Energieeinsparung wurden mit den verschiedenen Betreibern und Nutzern vielfältige Erfahrungen gemacht, die nachfolgend exemplarisch dargestellt werden. Anlass für ein Anlagenmonitoring sind häufig Mängel im Betrieb von Wärme- und Kälteanlagen. Die gesicherte Versorgung hat oberste Priorität.

Mögliche Energieeinsparungen sind erwünscht stehen aber nicht im Vordergrund. Im gewerblichen Bereich ist das Verhältnis von Kosten und Nutzen bei fast allen Entscheidungen von Bedeutung. Da die Energiekosten im Bereich des verarbeitenden Gewerbes in der Regel aber nicht mehr als 5% der Gesamtkosten [1] ausmachen, werden Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Regel nicht primär aus Gründen der Kosteneinsparung initiiert. Im Dienstleistungssektor ist das Verhältnis von Energiekosten zu Gesamtkosten noch geringer.

Bei Instandhaltungsmaßnahmen und Investitionen welche den energetischen Bereich betreffen, können, durch eine rechtzeitige Berücksichtigung der möglichen Alternativen, häufig kostengünstige Einsparungen realisiert werden. Bei der Bewertung von möglichen Verbrauchseinsparungen ist neben der Einsparung an Arbeit, auch die Leistungseinsparung sowie die Einsparungen bei den Instandhaltungs- und Wartungskosten zu berücksichtigen.

Der Aspekt für die finanzielle Beurteilung von Maßnahmen zur Energieeinsparung ist das Verhältnis von Kosten zu Nutzen. Entsprechende Betrachtungen erfolgen unter 9.12.5.

Im Vordergrund der Untersuchung stehen komplexe Versorgungsanlagen bei denen nicht ohne weiteres zu erkennen ist, ob diese Anlagen fachgerecht und energieeffizient betrieben werden. Aufgrund der Größe der Objekte ist in der Regel Servicepersonal vorhanden, so dass einige Fehler direkt behoben werden können. Für die anderen Arbeiten sind externe Fachkräfte hinzuzuziehen.

9.12.1 Probleme bei der Umsetzung vorgeschlagener Maßnahmen

Behebung von Fehlern

LANUV Essen

Die Durchflussmessung war längere Zeit defekt. Der Rahmenvertragspartner konnte das Problem nicht lösen. Eine Reparatur musste direkt vom BLB-Duisburg beauftragt werden und erforderte mehrfache Abstimmung mit dem Lieferanten Siemens. Die Behebung dauerte länger als ein halbes Jahr.

Die Beseitigung von Bypässen erfolgte bei Ortsterminen von PLENUM und dem Mieter durch Eingriffe vor Ort bzw. durch eine Heizungsfirma über den Einbau von Stauscheiben. Die Beseitigung von Bypässen im Bereich der Gewächshäuser dauerte extrem lange, letztendlich wurde die Ansteuerung der Ventile durch Kieback&Peter überarbei-

tet. Die Beseitigung des Bypasses in der Belüftung des Technikums ist über Jahre nicht erfolgt. Ursache hierfür waren geplante Umbauarbeiten in der Nutzung der Räume. Das Mischventil für den Hauptvorlauf fiel während des Projektes aus. Eine Eingrenzung konnte mit den Daten des Monitorings erfolgen. Da hier eine zentrale Funktion der Wärmeversorgung gefährdet war, erfolgte die Reparatur zügig.

Bezirksregierung Düsseldorf

Es kam kein Ausfall von Komponenten vor. Der langsame Ausfall einer Bypassbeseitigung war schwer zu erkennen, da in dem entsprechenden Heizkreis die Rücklauftemperatur nicht erfasst wurde. Der fehlende Fühler wurde nachgerüstet und die defekte Stauscheibe ersetzt.

Die Raumtemperaturen sind vielfach zu hoch. Eine Verringerung hätte durch den Hausmeister durch Veränderungen der Raumthermostate und Durchflussbegrenzungen erfolgen können. Das dafür erforderliche Engagement fehlte allerdings.

Eine Senkung des Energieverbrauchs erfolgte durch eine Absenkung der Abschalttemperatur. Die Maßnahme konnte ohne Zeitverzögerung umgesetzt werden, da ein Interesse des zuständigen Mitarbeiters gegeben war.

Kreispolizeibehörde Mettmann

Der Betrieb der Wärmepumpe weist immer wieder Mängel auf. Insbesondere bei der Umschaltung von einem Heiz- auf einen Kühlbetrieb oder vice versa kommt es praktisch regelmäßig zu Ausfällen. In diesem Fall erwies sich die Einschaltung eines Rahmenvertragpartners als hinderlich, da die erforderliche Fachkompetenz fehlte und die ergriffenen Maßnahmen zu einer Verschlechterung führten. Allerdings konnte auch der Hersteller bisher keinen langfristig zufriedenstellenden Betrieb erreichen.

Bei der Wärmepumpe ist eine Stromerfassung möglich. Bei der Erfassung der Einzelphasen kann es zu zwei Ausfällen, so dass eine Bilanzierung des Wirkungsgrades nicht möglich ist. Trotz vielmaligem Anmahns ist über mehrere Jahre keine Reparatur erfolgt, da sich offensichtlich niemand für den ordnungsgemäßen Betrieb der Anlage verantwortlich sieht.

Ähnlich frustrierend ist der über lange Zeit nicht erfolgte Ausbau einer Pumpe, welche nach dem Ausbau der Hydraulischen Weiche nicht mehr benötigt wurde und deren Ersatz über ein Passstück. In der Folge konnte die Temperaturspreizung im Heizungs-puffer nicht genutzt werden. Dies hatte ein häufigeres Takten des BHKWs zur Folge.

Als Folge einer fehlenden Unzuständigkeit wurden Mängel, welche den aktuellen Betrieb nicht gefährden häufig nicht behoben.

Als Folge einer Unterdimensionierung des Rückkühlwärmetauschers kann diese nicht über einen längeren Zeitraum betrieben werden. Dieser Mangel hat im praktischen Betrieb keine gravierenden Auswirkungen. Auf eine Beseitigung des Fehlers wurde vorerst verzichtet.

Schule Mendelssohnstraße

Probleme mit der GLT konnten durch einen Neustart der Rechner unproblematisch behoben werden.

Die Beseitigung einer fehlerhaften Einbindung eines neuen Verbrauchers konnte mit unserer Anlagenbetriebsüberwachung erkannt werden. Die Beseitigung erforderte einen kommunikativen Aufwand, erfolgte letztendlich aber unproblematisch.

Eine Unterversorgung in einigen Klassenhäusern hängt vermutlich damit zusammen, dass sich die voreinstellbaren Ventile langsam zusetzen und der Durchfluss sich da-

durch verringert und eine ausreichende Wärmeversorgung nicht mehr sichergestellt ist.

Schule Sterntalerstraße

Bei dieser Schule wurden insgesamt positive Erfahrungen mit der Beseitigung von auftretenden Mängeln gemacht. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass eine Firma mit der Wartung der Regelungstechnik beauftragt ist und auftretende Mängel zeitnah behebt. Weiterhin ist der Hausmeister engagiert und kümmert sich um den laufenden Betrieb. Nicht zuletzt ist der Betreiber daran interessiert, den Energieverbrauch und damit auch die Kosten zu senken. Vorschläge im Rahmen des Monitorings konnten so zeitnah umgesetzt werden und hatten dann auch entsprechende Einsparungen zur Folge.

LMT-Group

Die Beseitigung von Bypässen erfolgte teilweise mit größerer zeitlicher Verzögerung. Ursache hierfür war eine Überlastung der für die Haustechnik zuständigen Mitarbeiter. Von den Mitarbeitern wurden die Möglichkeiten genutzt, welche unser Anlagenmonitoring bietet, den Betrieb zu überwachen und auch direkte Kommentare zur Verfügung zu stellen.

Die Behebung größerer Mängel, etwa die Entfernung der Hydraulischen Weiche im Zusammenhang mit der Errichtung eines Neubaus benötigte hingegen vergleichsweise viel Zeit.

Für die Beseitigung größerer Mängel ist oft kein Geld vorhanden, vielmehr müssen solche Vorhaben in die Finanzplanung des nächsten Jahres übernommen werden und dort ist dann häufig der Neubau eines Gebäudes oder die Verlagerung von Betriebsteilen wichtiger als das normale Geschäft einer effizienten Energieversorgung.

Umsetzung vorgeschlagener Maßnahmen

LANUV Essen

Die Sanierung der Wärmeverteilung ist erfolgt. Die Beseitigung von Bypässen ist immer noch befriedigend abgeschlossen. Die Ansteuerung der unterschiedlichen Wärmeerzeuger erfolgt mittlerweile problemlos. Möglichkeiten zu einem prädiktiven Betrieb der BHKWs, um elektrische Lastspitzen zu vermeiden, bzw. zu reduzieren, wurden nicht weiterverfolgt, da die Umsetzung und die GLT von Kieback&Peter noch nicht absehbar war. Statt dessen wurden entsprechende Ansätze einer prädiktiven Regelung bei der Kieback&Peter Zentrale in Berlin realisiert.

Bezirksregierung Düsseldorf

Um Nacht- und Wochenendabsenkungen realisieren zu können, wurden entsprechende Umbauten am Heizungssystem vorgenommen. Um die Auswirkung der geplanten Maßnahme besser beurteilen zu können, wurden Raumtemperaturmessungen in 40 exemplarischen Räumen vorgesehen. Die dafür erforderlichen Nachrüstungen sind noch nicht abgeschlossen.

Kreispolizeibehörde Mettmann

Das Gebäude der Kreispolizeibehörde weist in der Anlagentechnik zur Wärme- und Kälteversorgung über eine Betonkernaktivierung erhebliche Mängel auf. Ein weitgehend ausgearbeiteter Vorschlag zur Verbesserung der Situation auf der Westseite des Gebäudes konnte im Rahmen des Forschungsprojektes nicht umgesetzt werden, da der Betreiber die Eigenbeteiligung an den Umrüstkosten abgelehnt hat. Mittler-

weile haben sich die Mieter nach 10 Jahren Dauer an die extremen Belastungen in diesem Gebäudeteil offensichtlich gewöhnt.

Schule Mendelssohnstraße

Auf den Einsatz einer prädiktiven Regelung für den Kesselbetrieb und die Speicherbe-
ladung wurde verzichtet, da die Erfolgsaussichten für eine Umsetzung in der Zentrale
von Kieback&Peter als höher eingestuft wurden und der Schulbau Hamburg nicht bereit
war sich ausschließlich für Forschungszwecke an einer Kofinanzierung der erforderli-
chen Ventile zu beteiligen.

Schule Sterntalerstraße

Die vorgeschlagenen Nachrüstungen zur besseren Beurteilung des Anlagenbetriebes
wurden umgesetzt. In der Folge konnte der Energieverbrauch kontinuierlich gesenkt
werden. Eine Fortsetzung der Optimierungsmaßnahmen ist vorgesehen.

LMT-Group

Eine Umsetzung der vorgeschlagenen Nachrüstungsmaßnahmen ist weitgehend aus-
geblieben. Ursächlich hing dies mit der komplizierten Umsetzung der Bezuschussung
von Umrüstungen durch das ISE zusammen. In der Folge wurde der GLT-Hersteller
Honeywell beauftragt den Betrieb der Einspeisepumpen in die Ringleitung zu optimie-
ren und Nachrüstungen in die Messtechnik wurden nicht weiter umgesetzt.

Dies hatte zur Folge, dass die effizienteste Methode der Energieeinsparung nämlich
die Absenkung der Rücklauftemperatur im Netz nicht konsequent verfolgt wurde und
dadurch die Nutzung der Kompressorabwärme nicht konsequent verfolgt wurde. Neben
der kostenlosen Nutzung der Abwärme hätten so auch die Kosten für die Rückkühlung
der Kompressoren eingespart werden können.

Ebenso unterblieben Maßnahmen zur Optimierung des Kesselbetriebes mit der Folge,
dass die vorhandenen Economizer nicht genutzt werden können.

9.12.2 Überprüfung von Neuanlagen zur Abnahme

Es hat sich als wirkungsvoll erwiesen, eine Anlagenmonitoring zur Überprüfung von
neuen, komplexen Heizungsanlagen einzusetzen. Auf diese Weise können Fehler beim
Anlagenbetrieb, etwa durch fehlerhafte Regelungstechnik, frühzeitig erkannt und abge-
stellt werden. Ein entsprechendes Inbetriebnahmemonitoring muss mindestens über
den Zeitraum eines Jahre erfolgen.

Ein dauerhaftes Anlagenmonitoring gestattet es darüber hinaus Änderungen, welche
sich aus Umbauarbeiten oder Ergänzungen ergeben in ihrer Auswirkung zu beurteilen.
Bestehende, gut betriebene Anlagen können durch Nachrüstungen, etwa in Pfortner-
logen oder auch bei der nachgerüsteten Belüftung von Garagen, zu einem unbefriedi-
genden Versorgung aller anderen Verbraucher führen.

Der Aufwand hierfür ist begrenzt, da in der Regel Gebäudeleittechniken zur Anla-
gensteuerung vorhanden sind, mit denen auch Trenddaten erfasst werden können.
Es müssen in der Regel nur zusätzlich Rücklauftemperaturen erfasst werden, welche
wichtige Informationen zum Anlagenbetrieb liefern. Zusätzlich sollten auch die Infor-
mationen aus Wärme-, Kälte- und Stromzählern erfasst werden.

Bei Stromzählern sollte neben der Arbeit auch die Aktuelle Leistung ausgegeben wer-
den. Auf diese Weise ist es möglich auch den Betrieb einzelner Geräte zu erfassen.
Hierfür reicht in der Regel die Auflösung der erfassten Arbeit nicht aus.

9.12.3 Förderung von Engagement

Es gibt erfolgreiche Programme zur Förderung der Energieeinsparung. Ein sehr wirkungsvolles Modell stellen fifty/fifty-Projekte dar. Bei diesen werden die erzielten Einsparungen durch sparsames Verhalten zwischen dem Nutzer/Mieter und dem Betreiber/Eigentümer aufgeteilt. Die dadurch erzielbaren Einsparungen betragen bei Wärme in der Regel bis zu 20 %.

Die Beobachtung zeigt, dass Hausmeister sich sehr unterschiedlich stark für die Einsparung von Energie einsetzen. Sofern es also nicht schon entsprechende Programme gibt, sollte daher erwogen werden diese etwa mit 2 % der Einsparung an den Einsparungserfolgen zu beteiligen. Dies hätte zur Folge, dass die Betreiber die restlichen 98 % der Einsparungen erzielen. Die damit verbundenen arbeitsrechtlichen Probleme wären allerdings vorher zu klären.

9.12.4 Beispielhafte Ergebnisse aus dem Anlagenmonitoring

Das Anlagenmonitoring dient dazu den laufenden Betrieb zu dokumentieren und Veränderungen, welche auf einen fehlerhaften Betrieb hindeuten frühzeitig zu erkennen. Beispiele für die Vielzahl der möglichen Fehler, welche durch Regeln erkannt werden können, sind im Arbeitspaket B.3, Fehleranalyse, Kapitel 5.5.1 in tabellarischer Form aufgelistet. Eine Auswahl der tatsächlich gefundenen Fehler findet sich in den Tabellen 9.4-1, 9.5-1, 9.6-1, 9.7-1, 9.8-1, 9.9-1, 9.10-1 und 9.11-1.

Da es sich bei den zu untersuchenden Objekten bei OBSERVE um Bestandsobjekte im Bereich von Nichtwohngebäuden mit unterschiedlicher Nutzung und Anlagentechnik handelt, ist eine Verallgemeinerung der Methoden nur schrittweise möglich. Die Ausstattung der Objekte mit Messtechnik ist sehr unterschiedlich. In der Regel sind nur Sensoren verbaut, welche für die Regelungstechnik erforderlich sind. Rücklauftemperaturen und Durchflüsse werden beispielsweise in der Regel nicht systematisch erfasst, obwohl sie für die Erkennung von Fehlern eine große Bedeutung haben.

Die höchsten Einsparungen durch das Anlagenmonitoring konnten in der Schule Stern-taler Straße erreicht werden. Diese Schule ist bei der Sanierung 2011 mit einer umfangreichen Messtechnik ausgestattet worden. Diese ermöglicht es Vorgenommene Änderungen im Betrieb gut zu beurteilen und auch den Ausfall von Komponenten rasch zu identifizieren.

9.12.5 Finanzielle Auswirkung energierelevanter Maßnahmen

Die nachfolgend vorgenommenen allgemeinen Einschätzungen beziehen sich in weiten Bereichen auf die Schlussfolgerungen im Kapitel 0.6 des Abschlussberichts von ModQS [2]. Sie werden ergänzt durch weitergehende Betrachtungen und Vorschläge zur Steigerung der Energieeffizienz.

Anlass für Sanierungsmaßnahmen sind häufig Mängel, die zu einer zeitweiligen Unterversorgung führen. Primäres Ziel ist in diesem Fall die Behebung dieser Mängel und nicht die Einsparung von Energie. Die dafür notwendigen Kosten sind ohnehin aufzubringen. Bei Instandhaltungsmaßnahmen und Investitionen welche den energetischen Bereich betreffen, können, durch eine rechtzeitige Berücksichtigung der möglichen Alternativen, häufig kostengünstige Einsparungen realisiert werden. Bei der Bewertung von möglichen Verbrauchseinsparungen ist neben der Einsparung an Arbeit, auch die

Leistungseinsparung sowie die Einsparung bei den Instandhaltungskosten und Wartungskosten zu berücksichtigen.

Allerdings wird die Realisierung von Energiesparmaßnahmen erschwert, wenn der Eigentümer und der Nutzer nicht identisch sind. Es kommt zu dem bekannten Mieter-Vermieter Konflikt. Der Mieter profitiert durch sinkende Aufwendungen für die Energieversorgung, der Vermieter verschlechtert gleichzeitig durch zusätzliche Ausgaben sein Betriebsergebnis. Dieses Problem tritt vermehrt im Bereich der öffentlichen Verwaltung auf, da die Verwaltung der Liegenschaften in den Finanzministerien eigenständigen Trägern übertragen wird. Die Mittel für die Bezahlung der Energie wird andererseits den Behörden und Dienststellen im Haushalt zur Verfügung gestellt. Ein direkter Anreiz zur Einsparung von Verbrauchskosten besteht nicht, da die nicht ausgeschöpften Mittel an das Finanzministerium zurückfallen. In diesem Fall unterbleiben leicht auch hoch wirtschaftliche Maßnahmen. Verschärft wird der Mieter-Vermieter Konflikt bei Unklarheit über den weiteren Verlauf des Mietvertrags.

Es gibt unterschiedliche Ansätze um den Mieter-Vermieter Konflikt zu lösen. Dazu zählen Intracting-Modelle und die Einführung von Warmmieten. Von Einzelfällen abgesehen ist hier noch keine befriedigende Lösung zu erkennen und die administrativen Widerstände sind beträchtlich. Eine weitere Möglichkeit ist die Einführung von Belohnungsmodellen. Mit großem Erfolg wird an Hamburger Schulen ein 50/50 Modell betrieben. Die über eine Bemessungsgrundlage hinausgehenden Einsparungen werden zwischen Finanzbehörde und Schule hälftig aufgeteilt. Auf diese Weise konnten durch Verhaltensänderungen Einsparungen zwischen 10 und 20 % ohne zusätzliche Kosten mobilisiert werden und es werden reale Einsparungen für den Staat erreicht. Dieser Ansatz kann möglicherweise auf das zu mobilisierende Engagement von Hausmeistern übertragen werden.

Verschärft wird die Problematik der institutionellen Hemmnisse durch die Notwendigkeit in den nächsten Jahrzehnten im Bereich der öffentlichen Hände den Energieverbrauch massiv zu reduzieren. In der Überlegung 1 sind Ansätze den Energieverbrauch bis 2020 um 20-25 % bis 2030 um rund 50 % und bis 2050 um 80 % zu senken. Aus ökonomischer Sicht müssten daher zumindest alle derzeit wirtschaftlichen Maßnahmen zur Energieeinsparung realisiert werden. Eventuell müssen auch darüber hinausgehende Mittel zur Verfügung gestellt werden. So wird beispielsweise bei Energiesparmaßnahmen der Freien und Hansestadt Hamburg nur eine 2/3-Wirtschaftlichkeit gefordert, da steigende Energiepreise entsprechende Maßnahmen in absehbarer Zeit wirtschaftlich werden lassen.

Bei der Erneuerung von gebäudetechnischen Einrichtungen ist eine Vielzahl von Auflagen, die den energetischen Standard betreffen, zu beachten. So regelt die EnEV die Anforderungen an den Wärmeschutz bei Gebäuden und die Anforderung an Heizungsanlagen. Bei der Ersatzbeschaffung und Nachrüstung von Pumpen sind beispielsweise die Anforderungen der EU-Verordnung 547/2012 zu beachten. Hiernach steigen die Anforderungen an den Effizienzindex beispielsweise von 2013 bis 2015 von 0,27 auf 0,23. Die besten am Markt verfügbaren Pumpen hielten 2009 schon den Wert von 0,20 ein, mittlerweile ist dieser Wert auf 0,17 gesunken. Die bisher üblichen, elektronischen Pumpen besitzen hingegen nur einen Effizienzindex von etwa 0,5. Dies entspricht einer potenziellen Minderung des spezifischen Stromverbrauchs von 66 %. Werden also heute diese besonders sparsamen Pumpen eingesetzt, so sind nur die Mehrkosten gegenüber den schon heute geltenden Anforderungen in Rechnung zu stellen. Vergleichbare Ansätze gibt es auch für den Betrieb von Lüftungsanlagen. Diese sind wegen der höheren Antriebsleistungen von besonderem Interesse.

9.12.5.1 Kosten durch fehlerhaften Anlagenbetrieb

Der Ersatz des defekten Heizungskessels im LANUV Essen verursachte Kosten in Höhe von 69.000 €. Grund war eine fehlerhafte Ansteuerung des Kessels. Die normale Lebensdauer dürfte um 50 % unterschritten worden sein.

Der vorzeitige Ausfall der BHKWs, als Folge eines zu häufigen Taktens, wird voraussichtlich Ersatzkosten in Höhe von rund 200.000 € verursachen. Wird die Lebensdauer durch einen fehlerhaften Betrieb um 25 % verkürzt, entstehen Mehrkosten in Höhe von 50.000 €, welche durch einen korrekten Betrieb hätten verhindert werden können.

Durch einen über einen Zeitraum von 20 Monaten fehlerhaften Speicherbetrieb, welcher dazu führte dass die Laufzeiten des BHKWs verkürzt waren, kam es vermehrten Startvorgängen. Diese führen zu einer vorzeitigen Alterung und, damit verbunden, zu erhöhten Wartungs- und Instandhaltungskosten. Dass solche Ausfälle nicht nur theoretisch ein Problem sind belegen langdauernde Ausfälle 2016 (1,5 Monate) und 2017 (2 Monate). In der Folge steigt der Stromverbrauch in diesen Zeiten und führt zu zusätzlichen Kostenbelastungen der Mieter.

9.12.5.2 Kosten durch nicht optimierten Anlagenbetrieb

Durch eine Absenkung der Raumtemperaturen in der Bezirksregierung um im Mittel 1 K sowie eine Wochenendabsenkung erwarten wir Verbrauchseinsparungen von jährlich 10-12 %. Bei Heizungsverbrauch von jährlich 2.500.000 kWh ergibt sich eine mögliche Einsparung von 250.000 - 300.000 kWh. Bei einem Arbeitspreis von 0,04 €/kWh ergibt sich eine zusätzliche Einsparung von 10.000 - 12.000 €/a.

9.12.5.3 Kosten durch überhöhte Rücklauftemperaturen

Bei der LMT-Group konnte gezeigt werden, dass durch eine Absenkung der Rücklauftemperaturen im Heizungsnetz um 10 K, abhängig vom Umfang der Druckluftherzeugung, die Abwärmenutzung um bis zu 40 kW ansteigt. Bei einer Absenkung der Rücklauftemperaturen um 15K und einer mittleren Druckluftherzeugung kann eine mittlere jährliche Wärmeleistung von 30 kW eingespart werden. Dies entspricht einer jährlichen Einsparung von rund 263 MWh,. Bei einem Arbeitspreis von 40 €/MWh und einem Kesselwirkungsgrad von 80 % ergibt das eine mögliche jährliche Einsparung von 13.000 €. Außerdem können die Kosten für die Rückkühlung der Kompressor eingespart werden. Die möglichen Gesamteinsparungen betragen also eher 20.000 €/a.

9.12.5.4 Kosteneinsparungen durch Monitoring

In der Schule Sterntalerstraße konnte durch das Monitoring die Anschlussleistung der Fernwärme um 1000 l/h gesenkt werden. Bei den derzeitigen Leistungspreisen der Fernwärme entspricht dies einer Kosteneinsparung von 7.600 €/a. Weiterhin konnte der jährliche Stromverbrauch durch eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen um insgesamt 32.000 kWh gesenkt werden. Bei einem Strompreis von 0,2148 €/kWh ergibt sich eine jährliche Einsparung von rund 6.800 €/a.

9.13 Fazit

In der Rückschau über einen Untersuchungszeitraum von mehr als sieben Jahren, welcher durch die Forschungsprojekte ModQS und OBSERVE abgedeckt wird, kommen wir zu einigen grundsätzlichen Schlussfolgerungen, welche die Ausrichtung und die Finanzierung ähnlicher Forschungsprojekte betreffen. Sie sind als Hinweise für die weitere Diskussion zu verstehen.

9.13.1 Verknüpfung von Modellentwicklung und Umsetzung

Die Zusammenarbeit bei der Entwicklung von Modellen zur Analyse von Daten aus dem Anlagenmonitoring und der praktischen Umsetzung bei der Identifizierung von Fehlern im laufenden Betrieb hat sich als fruchtbar erwiesen. Es konnten Bereiche, in denen solche Modelle erfolgreich eingesetzt werden können, bei sehr unterschiedlichen Verbrauchern bestimmt werden.

Als besonders interessant hat sich auch die Verknüpfung zwischen der Modellentwicklung zur Regelung von Komponenten, deren Umsetzung und anschließender Beurteilung herausgestellt. Im Rahmen des Anlagenmonitorings wurden umfangreiche Daten mit hoher Zeitauflösung gewonnen, welche teilweise Zeiträume von bis zu sieben Jahren abdecken. Diese stehen auch für weitere Analysen zur Verfügung.

9.13.2 Finanzierungsmodell für Umrüstungen

Bei diesem Forschungsprojekt gab es die Möglichkeit Umbauten und die Nachrüstung von Messtechnik mit 40 % zu bezuschussen. Dieses Fördermodell konnte in einigen Fällen genutzt werden. Insbesondere aber bei Umrüstungen, welche sich direkt aus den Forschungsansätzen ableiten, und bei denen ein Erfolg für die Betreiber nicht sicher erscheint, ist die Bereitschaft der Betreiber zu einer Kostenübernahme in Höhe von 60 % sehr begrenzt, sofern die Maßnahmen nicht aus anderen Gründen ohnehin beabsichtigt waren. Statt dessen scheint es sinnvoller zu sein, den Förderbetrag für einer vollständigen Förderung zu nutzen. In diesem Fall entfielen das Kostenrisiko für die Betreiber und die beteiligten Forscher könnten möglichst interessante Entwicklungen fördern. Auf diese Weise könnte der Ertrag der Mittel im Sinne des Forschungsvorhabens wesentlich gesteigert werden. Außerdem entfielen das zeitaufwendige Bewilligungs- und Abstimmungsverfahren, welches bei unserem Vorhaben auch dazu führte, dass einige Umsetzungen nicht realisiert wurden.

9.13.3 Dauer von Forschungsvorhaben

Es hat sich gezeigt, dass der Bewilligungszeitraum von drei Jahren, für die Durchführung von anspruchsvollen Forschungsvorhaben sehr knapp bemessen ist. Insbesondere ist dies der Fall wenn zunächst die wissenschaftlichen Voraussetzungen für praktische Anwendungen geschaffen werden. In diesem Fall ist eine Dauer von drei Jahren zu kurz. Bei einem Bewilligungszeitraum von vier Jahren könnten wesentlich mehr positive Ergebnisse realisiert werden.

In der Folge kommt es häufiger zu kostenneutralen Verlängerungen. Diese erfolgen dann allerdings auf Kosten der Antragsteller und können nur bedingt finanziell aufgefangen werden.

9.13.4 Hemmnisse bei der Umsetzung von Forschungsergebnissen

Ein Hemmniss für die Umsetzung von vielversprechenden Forschungsergebnissen ist durch den Interessengegensatz zwischen Eigentümer/Betreiber und Nutzer/Mieter zu sehen. Für die Betreiber stellen Kosten für Umrüstungen eine Mehrausgabe dar, welche den wirtschaftlichen Erfolg senkt. Die Nutzer profitieren von möglichen Einsparungen auch nicht direkt, weil die Mittel für den Betrieb im Haushalt zur Verfügung gestellt werden.

Bei den Betreibern steigt die Bereitschaft zu sinnvollen Nachrüstungen oder Ersatzinvestitionen erst, wenn die Mieter mit erheblichen Mietkürzungen drohen, wie wir mehrfach beobachten konnten.

Ein erfolgreiches Gegenmodell wird in Hamburg für öffentliche Gebäude praktiziert. Nach einer Vorabanalyse werden wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen mit einer 100%-Förderung umgesetzt. Deren Erfolg muss dann im Nachhinein nachgewiesen werden. In diesem Fall kommen die Einsparungen dem Bundesland zu Gute und werden nicht durch den Vermieter/Mieterkonflikt verhindert.

Für wirtschaftlich sinnvolle Maßnahmen müssen daher in größerem Umfang Mittel bereitgestellt werden.

Eine andere Möglichkeit besteht darin die Betreiber zu einer jährlichen Einsparquote zu verpflichten. Auf Grund der vorhandenen Sachkenntnis werden die Betreiber dann die kostengünstigsten Maßnahmen zur Energieeinsparung umzusetzen, um ihren eigenen Etat möglichst wenig zu belasten. Oft können solche Maßnahmen auch dazu genutzt werden einen Instandhaltungsstau aufzulösen, welcher ansonsten nicht bearbeitet werden würde.

Im gewerblichen Bereich, etwa bei mittelständischen Unternehmen, besteht ein weiteres Hemmnis. Größere Maßnahmen müssen vom Vorstand für das nächste Haushaltsjahr genehmigt werden. Für Forschungsprojekte entsteht dadurch eine zeitliche Verzögerung, bei der auch noch nicht absehbar ist ob es letztendlich zu einer positiven Entscheidung kommt. Dies stellt ein schwer kalkulierbares Risiko dar.

Im Schulbereich stellt bei neuen, gut gedämmten Schulgebäuden die Lüftung eine wesentliche Wärmeverlustquelle dar. Eine mechanische Belüftung mit Wärmerückgewinnung kann diese Verluste deutlich senken. Allerdings sind damit erhebliche Wartungs- und Instandhaltungskosten verbunden. Außerdem steigt der Stromverbrauch. Daher wird eine solche Maßnahme aus Kostengründen meistens abgelehnt. Die dadurch möglichen Energieeinsparungen und die Senkung der CO₂-Konzentration während der Nutzung der Klassen werden nicht genutzt.

Auch in diesem Fall müssen den Betreibern durch eine übergeordnete Festsetzung mechanische Belüftungen mit Wärmerückgewinnung vorgeschrieben werden.

So lange die Energiepreise so niedrig wie derzeit sind, besteht für die Einsparung von Energie selten eine ökonomischer Anreiz. Dieser muss durch andere Mechanismen kompensiert werden. Durch gesetzliche Anforderungen können bei Neubauvorhaben wichtige Impulse gesetzt werden aber auch Nachrüstungsspflichten schaffen die Voraussetzungen für die breite Einführung energieeffizienter Technologien.

Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Energiekostenbelastung im Verarbeitenden Gewerbe und im Sektor Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden.* <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiepreise-und-Energiekosten/energiedaten-energiepreise-36.html>, 06 2017
- [2] REHAULT, N. ; LICHTENBERG, G. ; SCHMIDT, F. ; HARMSSEN, A.: *Modellbasierte Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs (ModQS).* Abschlussbericht. 2013. – Forschungsbericht
- [3] SEWE, E. ; HARMSSEN, P.: *Fehlererkennung und Diagnose gebäudetechnischer Anlagen.* Workshop OBSERVE - Nichtwohngebäude energieeffizient betreiben, 2017

Anhang

A Schemata LANUV Essen

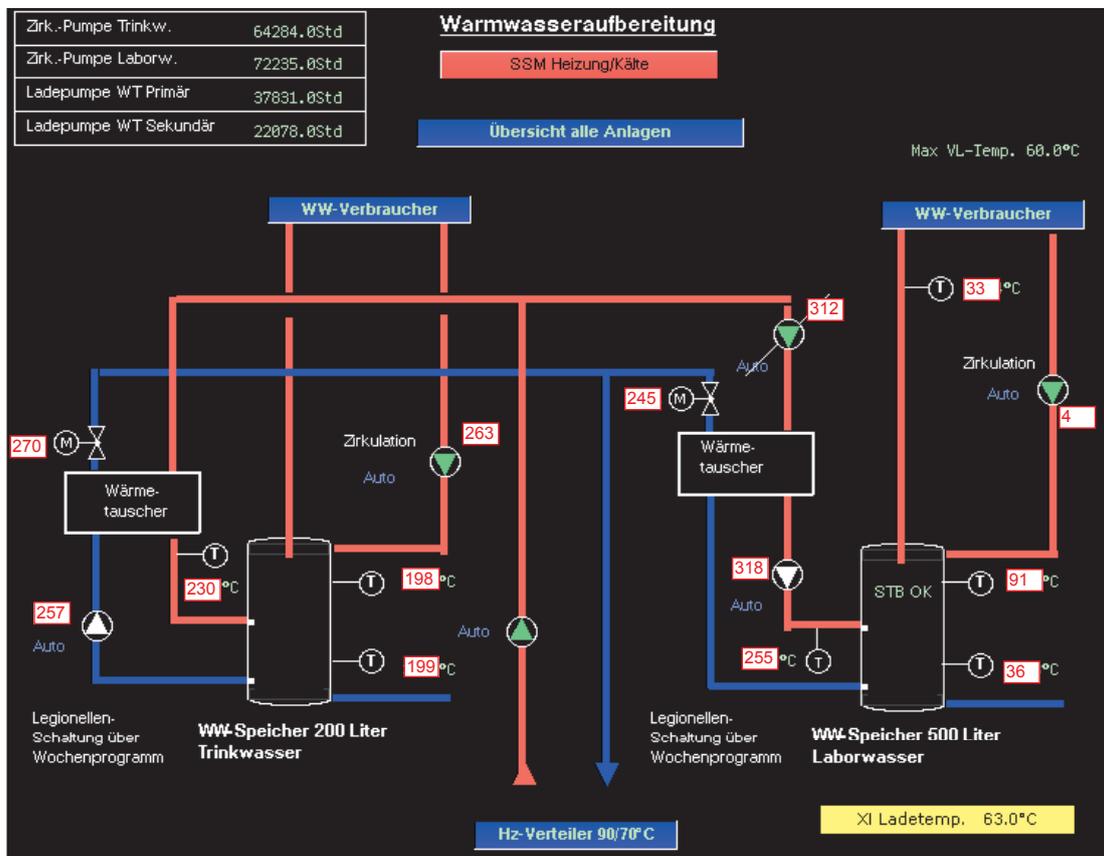


Abbildung A-1: Warmwasseraufbereitung LANUV Essen

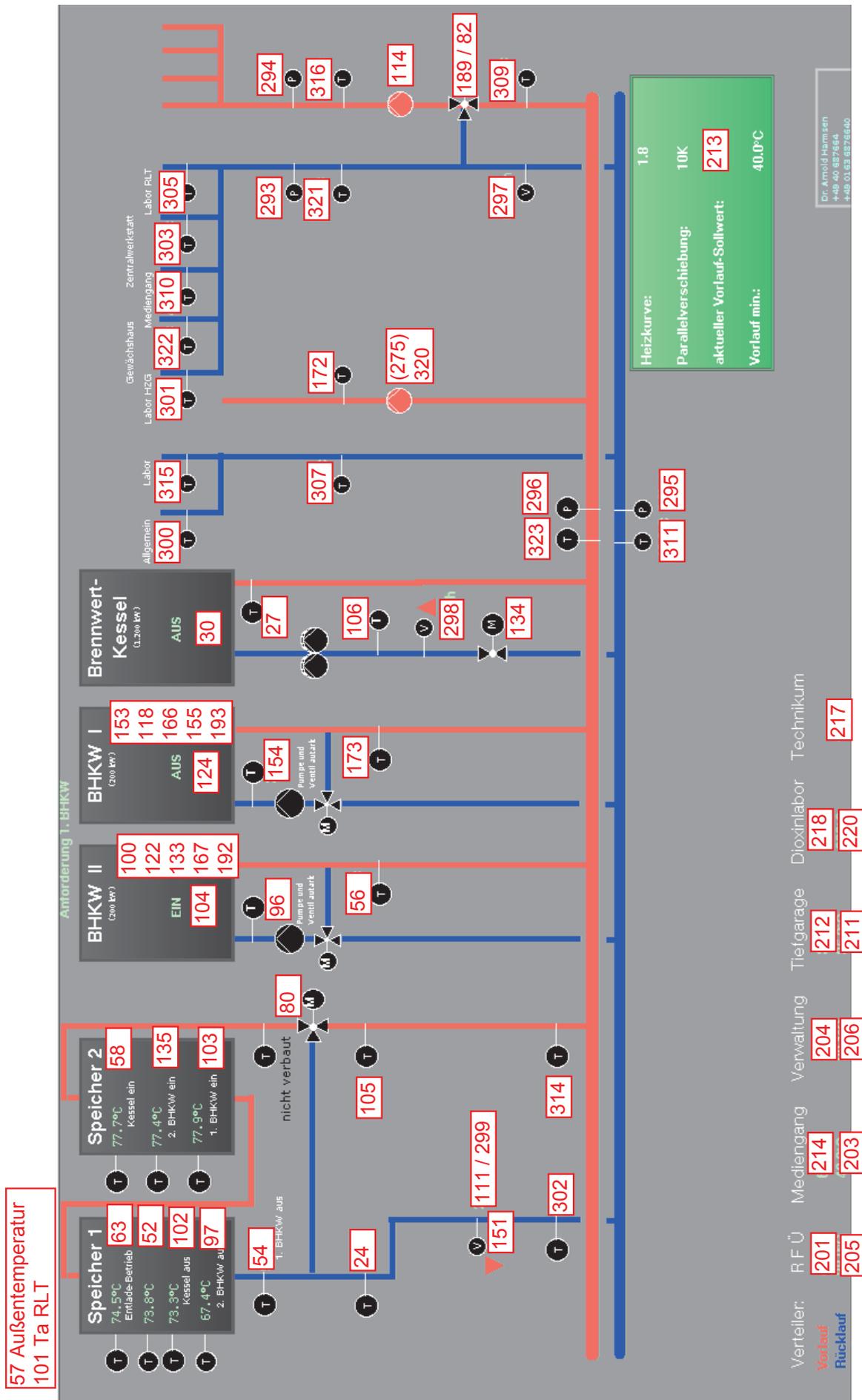


Abbildung A-2: Wärmeerzeugung LANUV Essen

B Bericht über die Identifikation von Bypässen im Heizungssystem sowie großer elektrischer Verbraucher im LANUV Essen vom 10. Oktober 2017

B.1 Ausgangssituation

Die Wärmeerzeugung des Landesamtes für Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) Essen erfolgt über zwei BHKWs mit je 189 kW thermischer Leistung sowie einem Spitzenlast-Gaskessel mit 1200 kW Leistung. Zusätzlich wird in der neuen Verwaltung ein Heizstab zur Warmwasserbereitung im Sommer verwendet, damit nicht das gesamte Netz mit einer Mindestvorlauftemperatur von 70 °C betrieben werden muss.

Im Sommer ist trotz geringer Wärmeabnahme ein ständiger Durchfluss von ca. 30 m³/h im Verbraucherkreis der Heizungsversorgung des LANUV Essen festzustellen. Dies ist ein Hinweis auf Bypässe im Heizungssystem, welche das ganze Jahr über zu erhöhten Rücklauftemperaturen führen und wodurch der Wirkungsgrad des Brennwertkessels sinkt. Hinzu kommen ein zusätzlicher Energieverbrauch der Netzpumpe, sowie höhere Zirkulationsverluste.

Außerdem soll die Zusammensetzung der elektrischen Grundlast analysiert werden. Aus dem Leistungsverlauf der Strommessung ergibt sich eine Grundlast von ca. 200 kW wie in Abbildung B-7 zu sehen ist. Eine Begehung, sowie die Messung ausgewählter Verbraucher soll die Hauptverursacher dieser Grundlast identifizieren.

B.2 Messung des Durchflusses Verbraucherkreis

B.2.1 Vorgehen Um festzustellen bei welchen Verbrauchern Bypässe bestehen wurde der Gesamtdurchfluss im Mischkreis der Verbraucher gemessen². Dies ist der gesamte Volumenstrom nach dem Mischventil, welcher aus der Heizzentrale zu den Verbrauchern fließt. Da die Gebäudeleittechnik nur den Durchfluss vor dem Mischventil misst ist ein Vergleich mit der stationären Messstelle nicht direkt möglich.

Während der laufenden Messung wurden nacheinander unterschiedliche Verbraucher über Absperrventile von Netz getrennt und sowohl der Zeitpunkt der Absperrung als auch der Wiederöffnung in einem Messprotokoll vermerkt. Falls der Durchfluss während der Trennung sinkt und nach dem Öffnen des Ventils wieder steigt, weist dies auf einen Bypass in Größe der Differenz hin, da bei den während der Messung vorherrschenden Außentemperaturen von 18 °C - 20 °C keine Wärmeabnahme zu erwarten war.

²Die Messung erfolgte mit dem portablen Ultraschall Durchflussmessgerät Fluxus F601 des Herstellers Flexim welches das Clamp-On-Verfahren verwendet.

B.2.2 Überprüfung der Messwerte Die Summe der Abgänge aus der Zentrale (Hauptstrang, Neubau Verwaltung, Laborlüftung) liegt mit $27,95 \text{ m}^3/\text{h}$ im Bereich des während der Messzeit festgestellten Gesamtdurchflusses von $27\text{-}30 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die Summe der Unterverbraucher am Hauptstrang 90/70 (Gewächshäuser Ost / stat. HZG, Technikum Lüftung, Plattenheizkörper Gang, Dioxinlabor, Verteiler Garage) mit $21,7 \text{ m}^3/\text{h}$ liegt ebenfalls nahe an der ermittelten Summe von $23,0 \text{ m}^3/\text{h}$

Der für den Verteilers Garage ermittelte Wert von $10,05 \text{ m}^3/\text{h}$ liegt auch nahe an der Summe der Einzelnen Verbraucher (EDV, stat. HZG, Fussbodenheizung, Wetteramt, RFÜ / Pavillion A) in Höhe von $9,25 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die ermittelten Durchflüsse sind daher plausibel.

B.2.3 Ergebnisse Der Zeitverlauf der Messung ist in Abbildung B-3 dargestellt, die Uhrzeiten der Trennungen sowie die aus den Messdaten ermittelten Differenzen im Durchfluss sind in Tabelle B-1 aufgelistet.

Die drei größten Bypässe (Technikum Lüftung $8,25 \text{ m}^3/\text{h}$, Laborlüftung $4,95 \text{ m}^3/\text{h}$, Abgang stat. HZG am Verteiler Garage $5,0 \text{ m}^3/\text{h}$) machen zusammen etwa $2/3$ des Gesamtdurchflusses im Sommer, und damit ebenfalls der gesamten zu erwartenden Bypässe im Winter aus.

Bei den Lüftungen handelt es sich um große Verbraucher. Im Betrieb der Anlagen sind Rücklauftemperaturen von unter $30 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erwarten. Dies ist allerdings nicht der Fall, siehe Abbildung B-4. Der Betrieb der Vorregelung für die Lüftungsanlagen ist zu überprüfen. Vermutlich werden die nicht benötigten Wassermengen im Bypass direkt in den Rücklauf geleitet. Dies wäre durch den Einbau von Stauscheiben im 3. Weg zu verhindern. Möglicher Weise sind aber auch defekte Rückschlagklappen die Ursache. Die Lüftung des Technikums, welche den größten einzelnen Bypass darstellt wird die meiste Zeit des Jahres überhaupt nicht benötigt und eine Versorgung der Anlage ist außerhalb von Nutzungszeiten nur zum Frostschutz notwendig. Die Anlage könnte daher als Sofortmaßnahme von der Wärmeversorgung getrennt, und nur im Bedarfsfall (Frost, Ringversuche) geöffnet werden. Ein solcher Handbetrieb ist jedoch nur eine temporäre, suboptimale Lösung welche in der Haustechnik für zusätzlichen Aufwand sorgt, eine dauerhafte technische Lösung soll im Zuge der Umnutzung des Technikumgebäudes erfolgen.

In der Abbildung B-4 ist die Rücklauftemperatur der Laborlüftungen über die Vorlauftemperatur des Verbraucherkreises aufgetragen. Die Temperaturspreizung ist im gesamten Betriebsbereich zu niedrig. Die Messdaten sind nicht korrigiert. Da die Vorlauftemperatur über einen Tauchfühler, die Rücklauftemperatur jedoch über einen Anlegefühler gemessen wird ist anzunehmen, dass die Rücklauftemperaturen in Wirklichkeit noch höher sind, die Temperaturspreizung also noch kleiner ist.

Die statischen Heizungen im alten Verwaltungsgebäude, welche einen Bypass von $5 \text{ m}^3/\text{h}$ verursachen sind vermutlich nicht korrekt abgeglichen, anderenfalls müsste der Volumenstrom selbst bei voll geöffneten Ventilen kleiner sein. Zusätzlich scheinen zahlreiche Thermostatventile defekt oder zumindest falsch eingestellt zu sein, anderenfalls dürfte bei den hohen Außentemperaturen während der Messung kein Bypass vorhanden sein. Es sind daher die Ober- und Unterteile der Thermostatventile zu prüfen, gegebenenfalls auszutauschen sowie ein hydraulischer Abgleich vorzunehmen.



Abbildung B-3: Zeitverlauf des Durchflusses im Mischkreis Verbraucher. Die Differenzen im Durchfluss, welche durch das Absperren einzelner Verbraucher ermittelt wurden, sind in Tabelle B-1 aufgeführt.

Tabelle B-1: Bypässe im Verbraucherkreis. Der Zeitverlauf, aus welchem diese Daten ermittelt wurden, wird in Abbildung B-3 gezeigt.

	Uhrzeit	Ermittelter Bypass [m ³ /h]
Gesamter Messzeitraum	12:00 - 14:30	27 – 30
Hauptstrang (alles außer Neubau- Verwaltung, Labor- gebäude, Loborlüftung)	12:30 – 12:34	23.0
Gewächshäuser Ost / stat. HZG	12:20 – 12:25	2.0
Technikum Lüftung	12:50– 12:53	8.25
Plattenheizkörper Gang	12:55 – 12:57	0.4
Dioxinlabor	13:07 – 13:10	1.0
Verteiler Garage	12:57 – 13:00	10.05
EDV	13:40 – 13:43	2.25
stat. HZG	13:46 – 13:49	5.0
Fussbodenheizung	13:52 – 13:55	~0
Wetteramt	14:00 – 14:03	~0
RFÜ / Pavillion A	13:34 – 13:37	2.0
RFÜ	14:11 – 14:14	1.25
Neubau Ver- waltung	13:02 – 13:05	~0
Laborlüftung	12:39 – 12:43	4.95

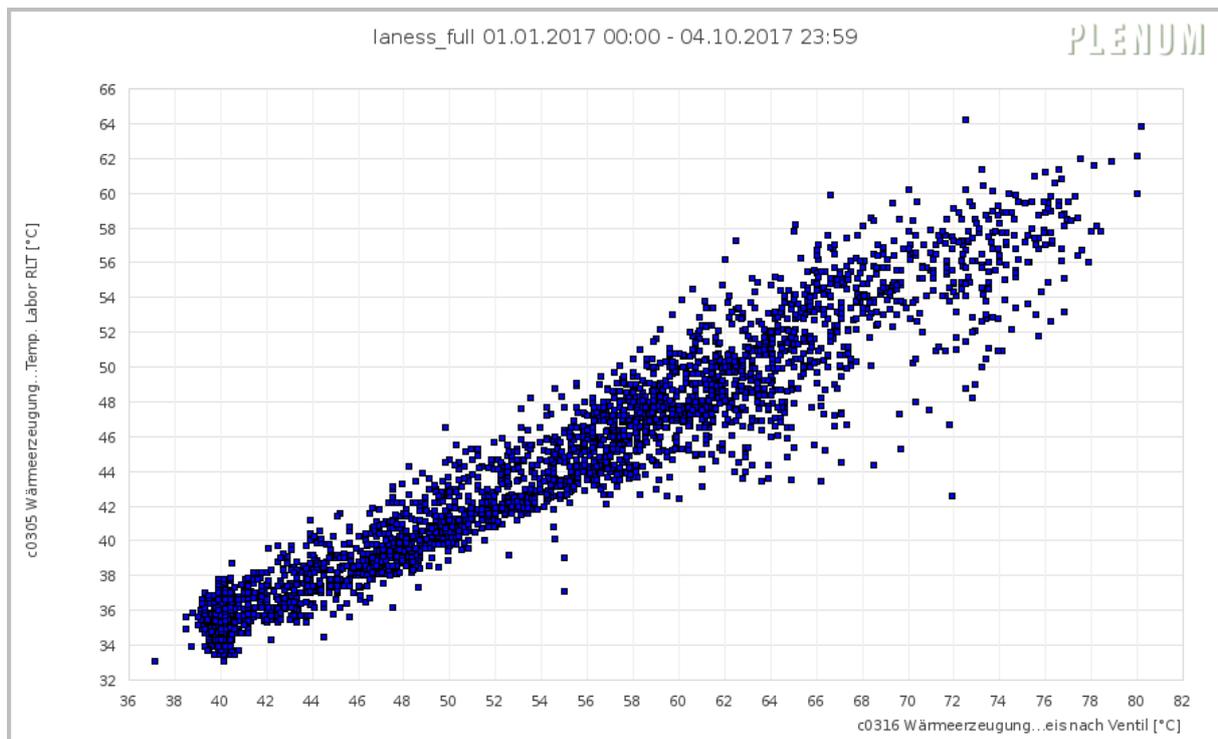


Abbildung B-4: Rücklauftemperatur Laborlüftungen über Vorlauftemperatur Verbraucherkreis vom 1.1. - 4.10.2017

B.3 Messung des Durchflusses Speicherladung

Gleichzeitig mit der Messung des Hauptvorlaufs wurde der Volumenstrom der Speicherladung gemessen. In Abbildung B-5 ist der Zeitverlauf dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der von dem vor Ort installierten *Siemens Sitrans F M* gemessene Durchfluss deutlich niedriger ist als der mit unseren mobilen Messung ermittelte. Der Zusammenhang zwischen den beiden gemessenen Durchflüssen ist in Abbildung B-6 zu sehen. Die Linearisierung, welche dort eingezeichnet ist, zeigt dass die Messung in etwa um den Faktor 2 zu niedrig ist, bei einer die y-Verschiebung des Signals von der Siemens-Messung um $-0,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Es wurde nur während eines Zeitraums von ca. 2 Stunden gemessen, während der der Speicher durchgehend geladen und nicht entladen wurde. Daher sind die Aussagen zur Größe und insbesondere dem Offset fehlerbehaftet, die grundsätzliche Feststellung bleibt aber zutreffend. Wir empfehlen dringend einen Abgleich dieser Messstellen durchführen zu lassen. Außerdem sollte die Auflösung der Messstelle verbessert werden, gegebenenfalls durch eine Skalierung z.B. in l/min . Die korrekte Messung des Volumenstroms bei Ladung und Endladung des Speichers ist wichtig da der Ladezustand es Speichers für die Regelungsstrategie der BHKWs von Bedeutung ist.

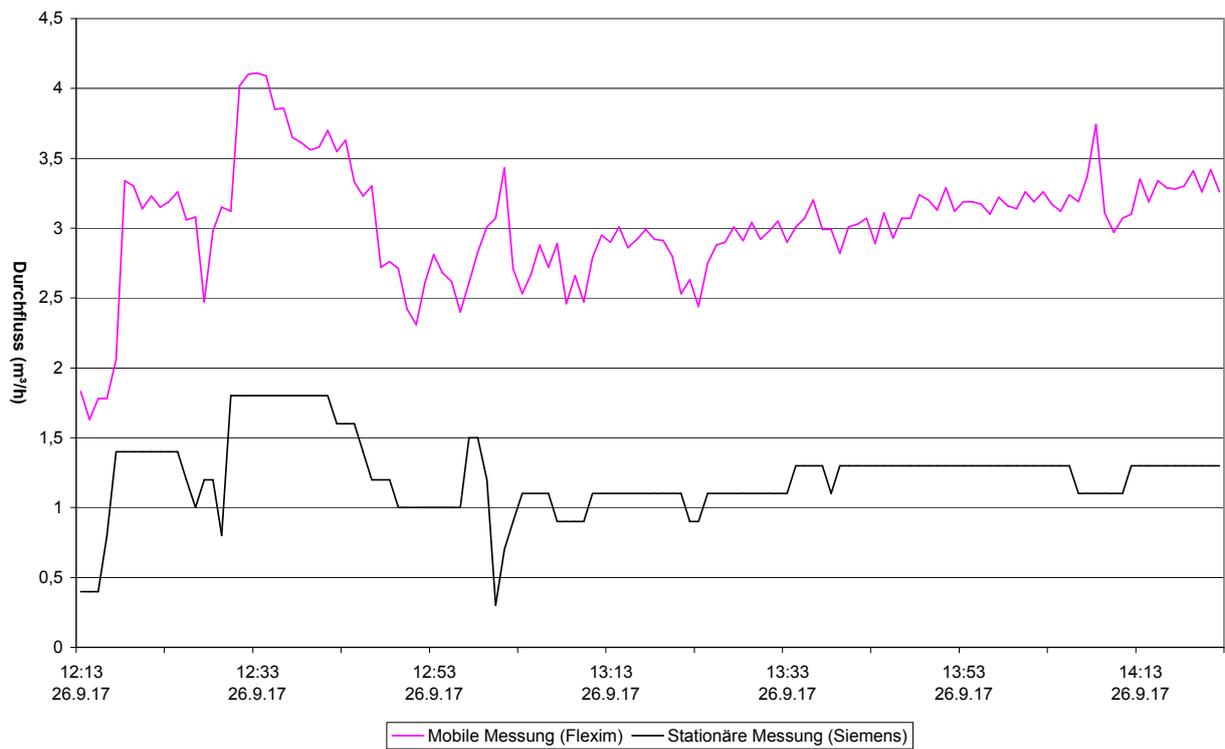


Abbildung B-5: Durchfluss der Speicherladung/entladung.

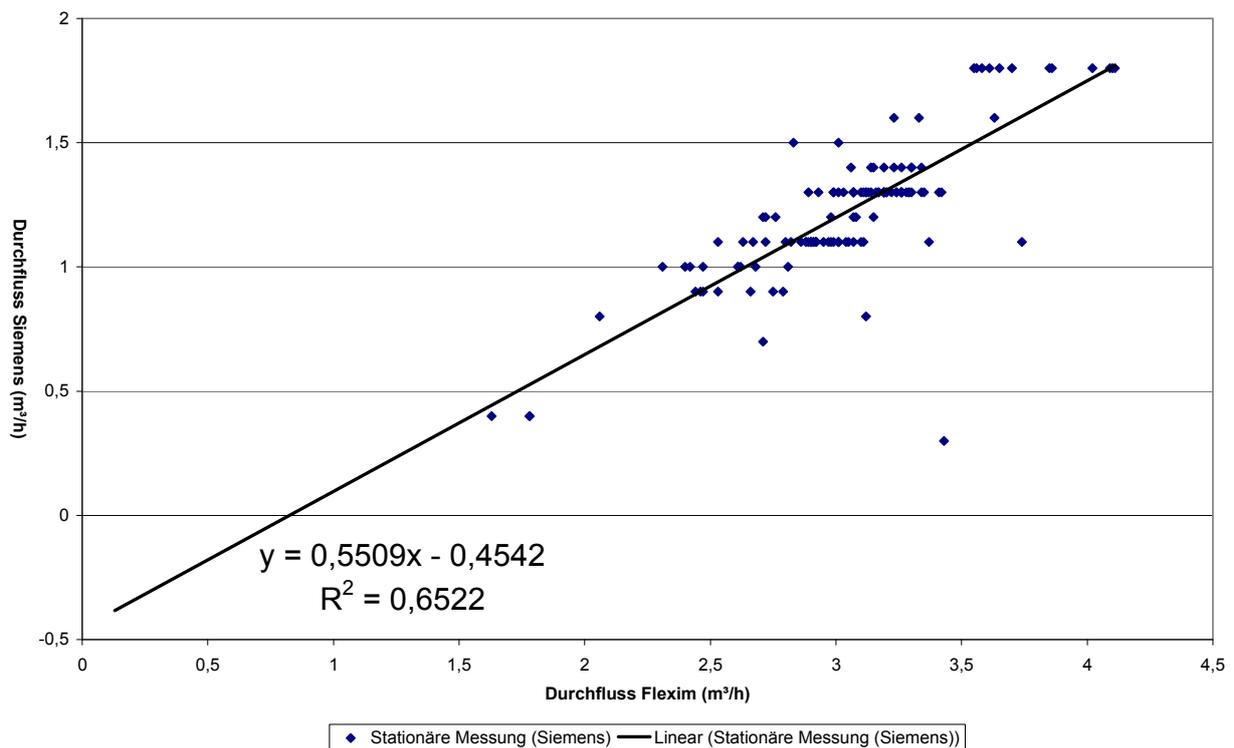


Abbildung B-6: Durchfluss Speicherladung. Die Messwerte der stationären Messung sind über die der mobilen Messung aufgetragen.

B.4 Messung der elektrischen Verbraucher

Ziel der Leistungsmessung war es Hauptverbraucher in der Anlagentechnik zu ermitteln und ihren Anteil an der Grundlast von ca. 200 kW festzustellen. In Abbildung B-7

ist der Leistungsverlauf eines Halbjahres dargestellt. Die Ermittlung dieses Leistungsverlaufs ist nicht trivial, da der gemessene Stromverbrauch (15-Minuten Werte) mit der Stromerzeugung durch die BHKWs (1-Minuten Werte) ergänzt werden muss. Der gezeigte Verlauf ist aus dem Jahr 2013, seitdem haben aber keine nennenswerten Änderungen an der Anlagentechnik stattgefunden. Gemessen wurden die Leistungsaufnah-

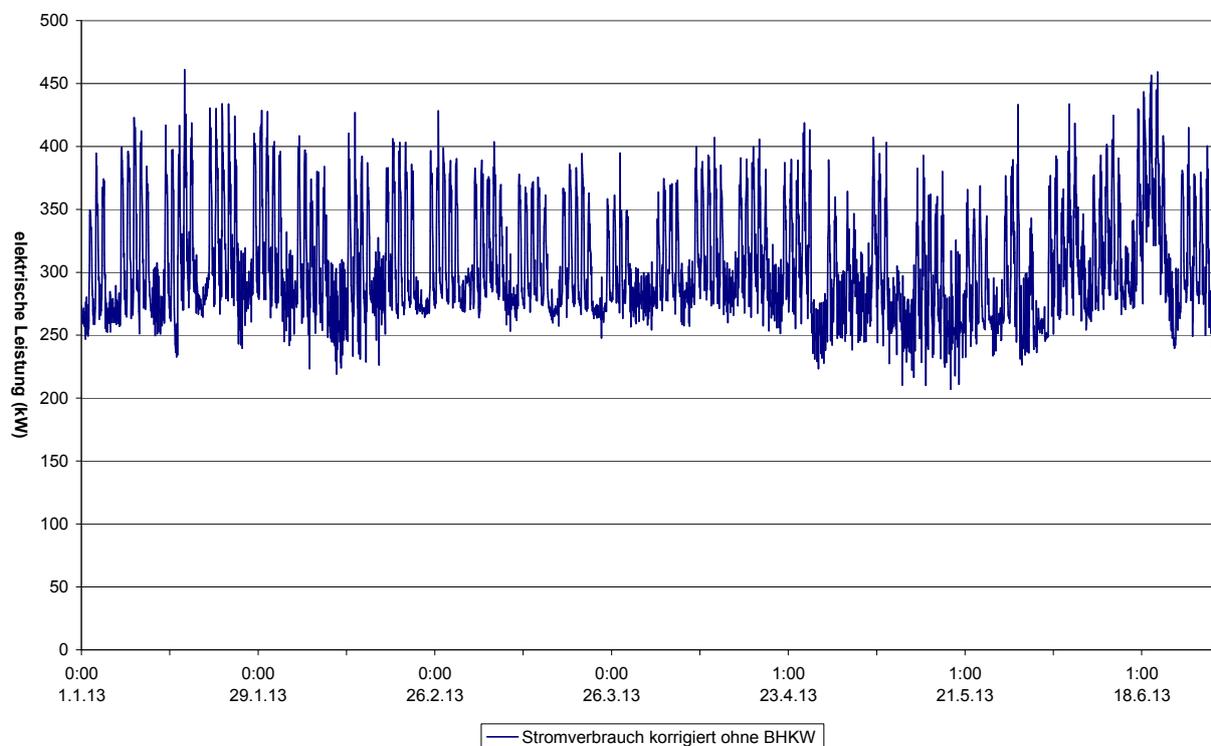


Abbildung B-7: Leistungsverlauf erstes Halbjahr 2013.

me der Zu- und Ablüfter der Laborgebäude Ost- und West in der Zeit vom 4.7.2017 16:00 Uhr bis zum 5.7.2016 08:00 Uhr sowie am 5.7.2017 um 10:15 die Einspeisung Kälte im Gebäude RFÜ an der auch Lüftungen hängen. Dazu wurde ein Dezem ZM8C-P Leistungsmessgerät eingesetzt. Dieses misst die Spannungen zwischen den drei Phasen und dem Nulleiter und kann über Stromwandler 32 Ströme Messen. Nach Zuordnung der Ströme zu den Spannungen werden Leistung, $\cos(\phi)$ und geleistete Arbeit intern berechnet. Das 10 Sekunden Mittel der einzelnen Leistungen wird dann alle 10 Sekunden über einen Eurotherm 6100A Messdatenlogger per Modbus/RTU abgerufen und zur Auswertung gespeichert. Die ermittelten Leistungsaufnahmen sind in Tabelle B-2 dargestellt. Der Wert der Einspeisung Kälte ist ein gemessener Momentanwert, die Werte der Lüftungen Laborgebäude entsprechen dem Mittelwert der über Nacht gemessenen Werte. Die Differenzen zwischen Zu- und Abluft weisen auf dezentrale Entlüftungen hin, welche durch eine Begehung auch in großer Zahl gefunden wurden. Unter der Annahme dass die Ablüfter in der Summe in etwa die selbe Leistung wie die Zulüfter aufnehmen, sollten auf die dezentralen Entlüftungen des Laborgebäudes weitere 14,7 kW entfallen, womit sich die Summe der ermittelten Grundlasten auf 105 kW erhöht.

Tabelle B-2: Gemessene Leistungen

Verbraucher	Leistung [kW]
Laborgebäude Zuluft Ost	21,9 kW
Laborgebäude Zuluft West	14,6 kW
Laborgebäude Abluft Ost	12,9 kW
Laborgebäude Abluft West	8,9 kW
Einspeisung Kälte RFÜ (incl. Lüfter)	31,0 kW
Summe	89,3 kW

B.4.1 Ergebnisse Die Einsparung von Grundlast ist besonders wirkungsvoll, da diese Leistung über einen Zeitraum von 8760 Stunden jährlich eingespart werden kann. Bei einer Leistungseinsparung von 20 kW Grundlast ergibt sich eine Jährliche Arbeitseinsparung von über 175 MW h. Um diese Arbeit mittels einer Photovoltaikanlage zu erzeugen würde eine Fläche von über 1000 m² benötigt. Es zeigt sich deutlich, dass die Einsparung von Grundlast die effektivste Strategie zur Steigerung der Energieeffizienz ist.

Mit der Messung an den Lüftungsanlagen und der Kälteerzeugung im RFÜ-Gebäude konnten rund 50 % des Grundlastverbrauchs nachgewiesen werden. Es wird empfohlen durch ergänzende Maßnahmen weitere Grundlastverbraucher zu identifizieren. Hierbei sollten in jedem Fall auch die Rechenzentren mit erfasst werden.

Im Bereich der Lüftungsanlagen des Laborgebäudes sollte erwogen werden durch eine Installation neuer Lüfter und Antriebe den Verbrauch um 40-50 % zu reduzieren.

Im RFÜ-Gebäude sollte die Klimatisierung der Rechnerräume überprüft werden, die hier ebenfalls ein erhebliches Einsparpotential zu erwarten ist.

C Bericht über die Messung des Stromverbrauchs in der Schule Sterntalerstraße vom 11. Juni 2015

C.1 Ziel der Messung

In den Jahren 2009 to 2013 fand eine Grundinstandsetzung der Schule Sterntalerstraße statt, im selben Zeitraum wurde die Schule auf Ganztagesbetrieb umgestellt. Durch die getroffenen Maßnahmen, welche u.a. einen Vollwärmeschutz der Fassaden und eine mechanische Belüftung umfassten, wurde der spezifische Wärmebedarf erfolgreich auf den Stand von EnEV 2007 - 40 % gesenkt. Im Zuge der selben Maßnahme stieg allerdings der Gesamtstromverbrauch der Schule um 309 %³, was dem Ziel der energetischen Sanierung der Schule zuwider läuft.

Es kommen verschiedene Ursachen für den gestiegenen Stromverbrauch in Frage. Dies ist zum einen im Zuge der Sanierung verbaute Technik, welche es vorher nicht gab. Hierzu gehören Pumpen, Ventilatoren, Stellmotoren, Sensorik und ähnliches. Des Weiteren kann der Stromverbrauch auch durch ein verändertes Nutzungsverhalten bzw. Nutzungszeiten gestiegen sein. Hierzu zählen insbesondere der durch den Ganztagesbetrieb hervorgerufene Mehrverbrauch und die Zubereitung von Speisen in der neu eingerichteten Aufwärmküche. Außerdem wurden in dem Zeitraum zusätzliche Verbraucher an das Stromnetz der Schule angeschlossen, welche in keinem Zusammenhang zu der energetischen Sanierung der Schule stehen, wie z.B. eine neue Elektroakustische Anlage (ELA), neue Boiler und eine batteriegestützte Notstromversorgung.

Ziel der Messung ist es, Ursachen für den erhöhten Stromverbrauch zu identifizieren und zu quantifizieren. Dabei ist von Interesse, wie sich der erhöhte Verbrauch auf im Rahmen der Grundinstandsetzung eingebaute zusätzliche Stromverbraucher wie z.B. Ventilatoren für die aktive Belüftung, auf geänderte Nutzungsanforderungen wie z.B. den Ganztagesbetrieb oder auf sonstige, von Umbau und Ganztagesnutzung unabhängige, Einflussfaktoren aufteilt.



Abbildung C-8: Klassengebäude Schule Sterntalerstraße

³Verglichen wurde der Zeitraum vom 1.4.2014 - 31.3.2015, in welchem 105 170 kW h verbraucht wurden, mit dem mittleren Verbrauch der Jahre 2007 - 2009 welcher 34 040 kW h beträgt.

C.2 Messaufbau

Zum Messen des Stromverbrauchs steht ein Messgerät zur Verfügung, welches die Spannung von 3 unterschiedlichen Phasen sowie, mittels Messumformern, 16 unterschiedliche Ströme messen kann. Daraus lassen sich 16 Wirkleistungen berechnen, welche von einem Datenschreiber im 30-Sekunden Takt erfasst werden. Die erfassten Werte sind jeweils Durchschnittswerte über das Erfassungsintervall, in diesem Fall 30 Sekunden. Insgesamt ist also die Leistungsmessung von bis zu 16 Einzelphasen bzw. 5 Drehstromanschlüssen im 30-Sekunden Takt möglich.

Gemessen wurde an der Hauptverteilung der Schule, von der sowohl Unterverteilungen, als auch einige Stromverbraucher der Verwaltung direkt abgehen. Die abgehenden Unterverteilungen sind Haus 1 - 5, Sporthalle, Pausenhalle/Musik Aufgang Bühne, Töpferraum und OG Verwaltung.

Für die Unterverteilungen von Haus 1 - 5, Sporthalle und Pausenhalle/Musikraum sind in der Hauptverteilung Stromzähler installiert, allerdings ist der Zähler von Haus 1 ist zur Zeit defekt, der Zähler Pausenhalle/Musikraum wird nicht über die GLT ausgelesen. Der Verbrauch der Verwaltung lässt sich aufgrund der baulichen Ausführung in der Stromverteilung nicht direkt messen, da es keine gemeinsame Vorsicherung bzw. Sammelschiene gibt, der Strom für die Verwaltung also an verschiedenen Stellen im Schaltschrank entnommen wird. Die Bestimmung des Gesamtstromverbrauchs der Verwaltung ist in Kapitel C.3.2 erläutert.

Während der Zeit vom 2.-30.4.2015 wurden der Hauptanschluss, Haus 1, sowie der Anschluss von Musikraum/Pausenhalle gemessen. Die mittels dieser Messung aufgestellte Gesamtbilanz wird als Referenz für den Gesamtstromverbrauch der Schule verwendet. In den folgenden Messreihen wurden einzelne Verbräuche gemessen, ihr Anteil am Gesamtverbrauch ist auf den Referenzzeitraum bezogen. Dieses Vorgehen rechtfertigt sich durch die ausgesprochen ähnlichen Wochenverläufe im regulären Schulbetrieb, es wurden auch jeweils vollständig Wochen, d.h. 7 Tage inklusive Wochenende miteinander verglichen. Eine genaue Auflistung welche Verbrauchsstellen in welchem Zeitraum gemessen wurden, ist in Tabelle C-3 zu sehen.

Die separate Erfassung von Haus 1 bei der mobilen Verbrauchsmessung ist notwendig, da der Stromzähler von Haus 1 seit dem 16.2.2014 defekt ist und bisher nicht ersetzt wurde. Der Zähler Pausenhalle/Musikraum musste für die Gesamtbilanz ebenfalls gemessen werden, da er nicht auf der GLT aufliegt. Für eine Gesamtbilanz, mittels der sich der Verbrauch der Verwaltung aus dem Verbrauch der Häuser 1 - 5, Sporthalle und Musikraum/Pausenhalle ergibt, werden also 9 der 16 bei dem Messaufbau zur Verfügung stehenden Kanäle verwendet. Die übrigen 7 Kanäle dienen der Messung einzelner Verbraucher, um deren Beitrag zum Verbrauch der Verwaltung zu erfassen. Der Stromverbrauch der Sporthalle wurde aufgrund der höheren Genauigkeit ebenfalls durch eine mobile Messung erfasst.

Im Zeitraum vom 30.4.-27.5.2015 wurden in zwei Messreihen ausschließlich einzelne Verbraucher oder Gruppen von Verbrauchern gemessen. In der Bilanzierung sind diese Verbräuche auf den im vorhergehenden Zeitraum ermittelten Gesamtverbrauch bezogen.

Tabelle C-3: Messstellen der Leistungsmessung in der Schule Sterntalerstraße

x gemessen, - nicht gemessen.

In Klammern () der Name der Sicherung, hinter der gemessen wurde.

	2.-23.4.	23.-30.4.	30.4.-11.5.	11.5.-27.5
Gesamt (0Q1)	x	x	-	-
Haus 1 (F88)	x	x	-	-
Musikraum/Pausenhalle (1F12)	x	x	-	-
ELA (F13)	x	x	-	-
Klimagerät R.10 (F60)	x	x	-	-
Dataport 1 (F56)	x	-	-	-
Dataport 2 (F57)	x	-	-	-
Steckdosen Datenschrank links (F27)	x	-	-	-
Außenbeleuchtung (3F3, F19-F27)	-	x	-	-
Boiler + Steckdosen (3F6, F46-F51)	-	x	-	-
Haus 2 (1F13)	-	-	x	-
Notstrom (1F17)	-	-	x	-
Boiler R.18, R.14, R.20 (F61-63)	-	-	x	-
Beleuchtung Verwaltung (3F1)	-	-	x	-
Gegensprechanlage (F12)	-	-	x	-
Steckdosen Verwaltung (3F5)	-	-	x	-
Durchlauferhitzer R.21 (F65)	-	-	x	-
Diverse Steckdosen (3F5)	-	-	x	-
Sporthalle (1F6)	-	-	-	x
Notstromversorgung (1F17)	-	-	-	x
Datenverteiler GVT (F20)	-	-	-	x
Diverse Steckdosen (3F4)	-	-	-	x
BMZ (F16)	-	-	-	x
Diverse Steckdosen (F51)	-	-	-	x

C.2.1 Validierung der Messergebnisse Zur Überprüfung der Messgenauigkeit werden die gemessenen Leistungswerte des Hauptanschlusses exemplarisch mit der vom Netzbetreiber gemessenen Wirkleistung, welche in einer Auflösung von 15 Minuten vorliegt, verglichen. Im Zeitraum vom 9.4.2015 00:00 Uhr bis 22.4.2015 23:59 Uhr ergibt sich aus den Daten des Netzbetreibers ein Wirklastverbrauch von 4198,77 kWh, unsere Messung ergibt 4188,26 kWh.

Die mittels der mobilen Strommessung gemessene Wirkleistung weicht in diesem Fall um 0,25 % von der Messung des Netzbetreibers ab, woraus auf eine hohe Genauigkeit der von Plenum durchgeführten Messungen geschlossen werden kann.

C.3 Bilanzierung

C.3.1 Vorgehen Da die Abrechnung über die verbrauchte Arbeit erfolgt, die verbrauchte Arbeit sich jedoch bei unterschiedlichen Messzeiträumen schwieriger als durchschnittliche Tages- oder Wochenleistungen vergleichen lässt, wurden letztere ermittelt. Diese haben neben der einfacheren Vergleichbarkeit den Vorteil der größeren Anschaulichkeit, da Leistungen im Alltagsgebrauch sehr viel häufiger Verwendung finden als die verbrauchte Arbeit.

Exemplarisch sei dies an der morgendlichen Spüllüftung eines Klassenhauses erläutert: Angenommen eine Spüllüftung läuft von 6:30 - 7:30 Uhr morgens, also $t = 1$ h, und verbraucht dabei $P = 2000$ W. Dann ergibt sich eine verbrauchte Arbeit von $W = P \cdot t = 2000 \text{ W h} = 2 \text{ kWh}$. Falls dies jeden Tag passiert ergibt das sowohl im Tages- als auch im Wochenmittel $P_{avg} = 2000 \text{ W}/24 \text{ h} = 83,3 \text{ W}$. Falls die Spüllüftung nur von Montag bis Freitag, also an fünf Tagen wöchentlich, betrieben wird, ergibt sich ein Wochenmittel von $P_{avg} = 2000 \text{ W} \cdot 1 \text{ h}/24 \text{ h} \cdot 5/7 = 59,5 \text{ W}$.

Da sich die Nutzung von Montag bis Freitag von der Nutzung am Wochenende erheblich unterscheidet, wird im Folgenden mit mittleren Leistungen pro Woche gerechnet. Bei der Messung wird dies bereits insofern berücksichtigt, als dass die Erfassung von einzelnen Messstellen jeweils einen zusammenhängenden Zeitbereich von mindestens $7 \cdot 24 \text{ h} = 168 \text{ h}$ umfasst, was auch aus der Tabelle C-3 ersichtlich ist. Die während der Pfingstferien vom 11.-15.5.2015 aufgenommenen Messdaten wurden nicht zur Analyse des Stromverbrauchs heran gezogen.

Zur Bestimmung des durchschnittlichen Gesamtstromverbrauchs wird für in der ersten Messreihe ein 14-tägiger Zeitbereich vom 9.-22.4.2015 betrachtet. Es handelt sich dabei um zwei vollständige Wochen. Der Zeitverlauf ausgewählter Messwerte dieser Messreihe ist in Abbildung C-9 zu sehen.

Für die anderen Messreihen wird jeweils ein zusammenhängender Zeitraum von 7 Tagen, in dem regulärer Schulbetrieb stattfand, betrachtet.

Die daraus errechneten durchschnittlichen Leistungen, sowie ihr Anteil an der durchschnittlichen Gesamtleistung der Schule, sind in Tabelle C-4 zu sehen.

Die Ermittlung der Grundlast P_{GL} einzelner Verbrauchsstellen dient dem Zweck, den vom Nutzungsverhalten unabhängigen, ganztägig stattfindenden, Verbrauch festzustellen. Der darüber hinaus gehende Verbrauch ist dann auf eine bestimmte Nutzung der Verbrauchsstelle zurückzuführen. Die Grundlasten ausgewählter Verbrauchsstellen sind in Tabelle C-5 dargestellt. Der Zeitverlauf der ausgewählter Messwerte zur Ermittlung der Grundlast, ist in Abbildung C-10 zu sehen.

Tabelle C-4: Durchschnittsleistungen P_{avg} der gemessenen Verbrauchsstellen, sowie ihr Anteil an der durchschnittlichen Gesamtleistung $P_{avg}/P_{avg,gesamt}$

Im unteren Teil der Tabelle sind gemessene Unterverbräuche des errechneten Wertes *Verwaltung aus Differenz* zu sehen.

<i>Verbraucher</i>	P_{avg} [W]	$\frac{P_{avg}}{P_{avg,gesamt}}$ [%]
Gesamt	12467	100
Sporthalle	1297	10.4
Musikraum/Pausenhalle	1358	10.9
Haus 1	3548	28.5
Haus 2	936	7.5
Haus 3	774	6.2
Haus 4	806	6.5
Haus 5	856	6.9
Verwaltung aus Differenz	2891	23.2
Gesamt	12466	100
<i>Unterposten Verwaltung</i>		
ELA (F13)	394	3.2
Klimagerät R.10 (F60)	322	2.6
Dataport (F56)	132	1.1
Steckd. Datenschrank links (F27)	15	0.1
BMZ (F16) x 2	22	0.2
Außenbeleuchtung (F22-F26)	51	0.4
Heizung R8 (1F8)	171	1.4
Notstrom (1F17)	84	0.7
Beleuchtung Verwaltung (3F1)	72	0.6
Steckdosen (3F4)	194	1.6
Steckdosen (3F5)	338	2.7
Boiler + Steckdosen (3F6)	238	1.9
Datenverteiler GVT (F20)	114	0.9
Beleuchtung Hof (F22-F26)	71	0.6
Steckdosen (F51)	315	2.5
Boiler R.18 (F61)	19	0.1
Boiler R.14 (F62)	32	0.3
<i>Summe Unterposten</i>	2584	20.9

Tabelle C-5: Grundlast P_{GL} ausgewählter Verbrauchsstellen,
Anteil der Grundlasten an dem Gesamtverbrauch der Schule.

Verbraucher	P_{GL} [W]	$\frac{P_{GL}}{P_{avg,gesamt}}$ [%]
Gesamt	5847	46.9
Sporthalle	340	2.7
Musikraum/Pausenhalle	458	3.7
Haus 1	1847	14.8
Haus 2	300	2.4
Haus 3	305	2.4
Haus 4	255	2.0
Haus 5	263	2.1
Verwaltung aus Differenz	2078	16.7
ELA (F13)	394	3.2
Klimagerät R.10 (F60)	241	1.9
Dataport (F56)	131	1.1
Tiefkühlschränke Haus 1	1567	12.6

C.3.2 Verwaltung Der Verbrauch der Verwaltung lässt sich aufgrund der baulichen Gegebenheiten im Stromverteilung nicht direkt messen, da es keine gemeinsame Vorsicherung bzw. Sammelschiene gibt, der Strom für die Verwaltung also an verschiedenen Stellen im Schaltschrank entnommen wird.

Während der gesamten Zeit vom 2.-30.4.2015 wurden der Hauptanschluss, Haus 1, sowie der Anschluss von Musikraum/Pausenhalle gemessen. Zusammen mit den Stromzählern der Häuser 2 - 5 sowie der Sporthalle, welche über die GLT ausgelesen wird, lässt sich über eine Gesamtbilanz die Leistung $P[W]$ der Verwaltung bestimmen.

$$P_{Verwaltung} = P_{Gesamt} - \sum_{i=1}^5 P_{Klassenhaus\ i} - P_{Sporthalle} - P_{Pausenhalle/Musik} \quad (.0.1)$$

Eine analoge Bilanz lässt sich durch Integration über die Zeit für die geleistete Arbeit $W[kWh]$ aufstellen. Alle nicht nicht gesondert erfassten Verbräuche werden, aufgrund der Bestimmung des Verbrauchs der Verwaltung über die Bilanzgleichung, dieser zugerechnet. Hierzu zählen insbesondere Garage, Werkstatt des Hausmeisters, und Teile der Heizungs- und Gebäudeleittechnik im Keller des Verwaltungsgebäudes. Die im Laufe der gesamten Untersuchung gemessenen Unterverbraucher der Verwaltung machen insgesamt 88% des gesamten Verbrauchs der Verwaltung aus und werden im unteren Teil von Tabelle C-4 gezeigt. Lediglich 12% des Verbrauchs der Verwaltung bzw. 2,8% des gesamten Stromverbrauchs der Schule wurden im Verlauf der vier Messreihen nicht erfasst.

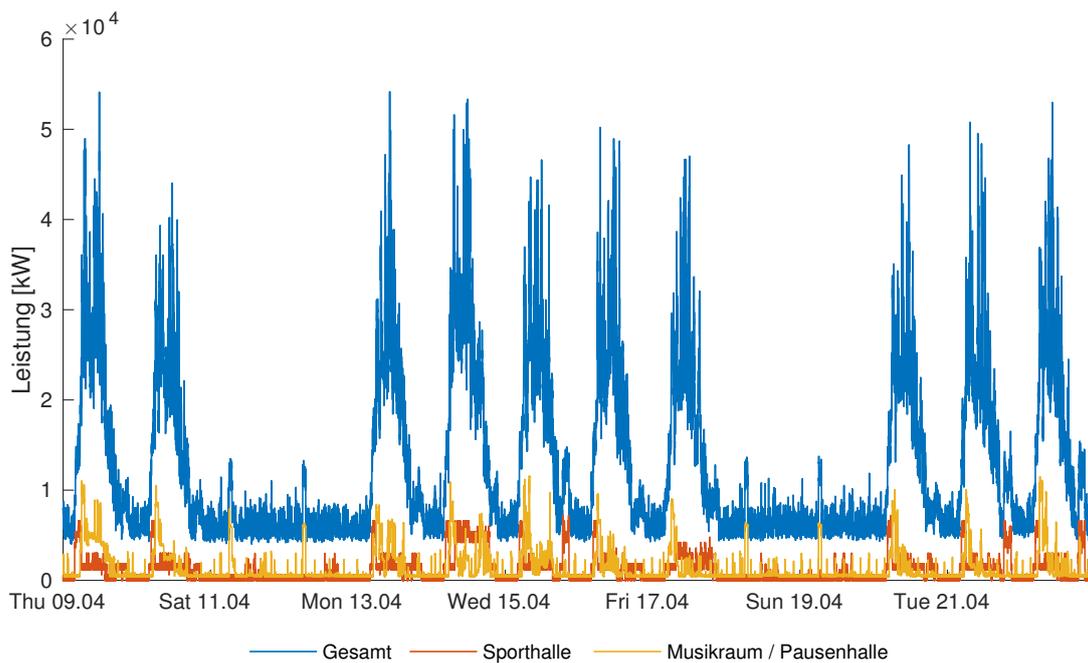


Abbildung C-9: Messwerte der Leistungsmessung über zwei Wochen, vom 9.4.2015 - 22.4.2015.

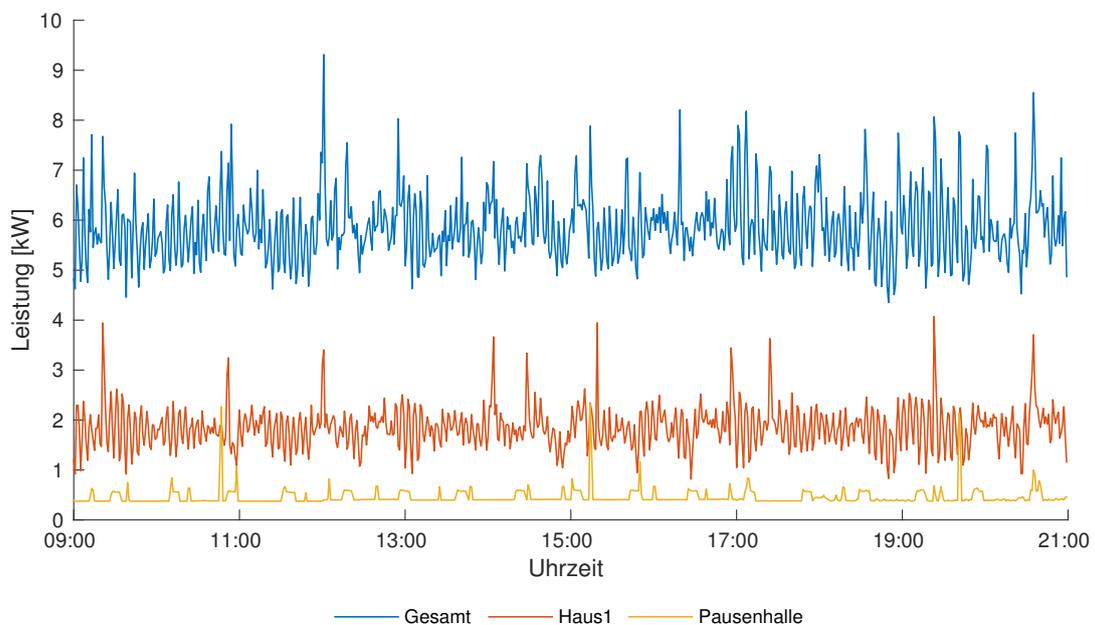


Abbildung C-10: Grundlast am 4.4.2015, hier exemplarisch von Hausanschluss, Sporthalle und Haus 1.

C.3.3 Neue Verbraucher, unabhängig von der Sanierung Die größten neuen Verbraucher welche unabhängig von der Sanierung sind, sind zum einen die Aufwärmküche mit den Tiefkühlschränken und die Elektroakustische Anlage (ELA) mit dazugehöriger Klimatisierung.

Der durchschnittliche Leistung der Tiefkühlschränke in Haus 1, ergibt sich aus der Differenz der in Tabelle C-5 gezeigten Grundlast von Haus 1 und dem Mittelwert der Grundlasten von Haus 2-5 zu 1567 W. Bei höheren Raumtemperaturen während der Sommermonate wird diese Leistung größer sein.

Eine konservative Schätzung der des Verbrauch der Aufwärmküche in Haus 1, ohne Kühlschränke, ist die durchschnittlich Verbrachten Leistung P_{avg} von Haus 1, abzüglich der Kühlschränke und der mittleren Verbrauch der Häuser 3 - 5 zu 1169 W. Haus 2 wurde bei dieser Berechnung, aufgrund der dort vorhandenen Lehrküche, nicht berücksichtigt. Tatsächlich wird der Verbrauch der Küche höher sein, da in Haus 1 nur zwei Räume für Lehrtätigkeiten zur Verfügung stehen, welche zudem vergleichsweise wenig genutzt werden, im Gegensatz zu Haus 2 - 5, in denen jeweils 4 Räume für Lehrtätigkeiten genutzt werden.

Die ELA, welche in der Schule inzwischen installiert ist, verbraucht im Tagesmittel 394 W.

Das dazugehörige Klimagerät hat einen temperaturabhängigen Verbrauch, welcher in Abbildung C-11 zu sehen ist. Auf dieser Datengrundlage ergibt sich, für die im Jahr 2014 vor Ort erfasst Außentemperatur, eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 317 W.

Der Datenschränk mit der Dataport-Technik hat eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 132 W.

Weitere neue Verbraucher, welche im Rahmen dieser Untersuchung nicht näher quantifiziert werden, sind:

- der Ofen in der Töpferwerkstatt,
- ein zusätzliches, voll ausgestattetes Büro in der Verwaltung,
- drei Whiteboards,
- Pausenverpflegung der Schüler_innen in der Pausenhalle, incl. Vorbereitung und Kühlschrank,
- verlängerte Nutzungszeiten durch den Ganztagesbetrieb,
- häufigerer Betrieb der Schulküche in Haus 2.

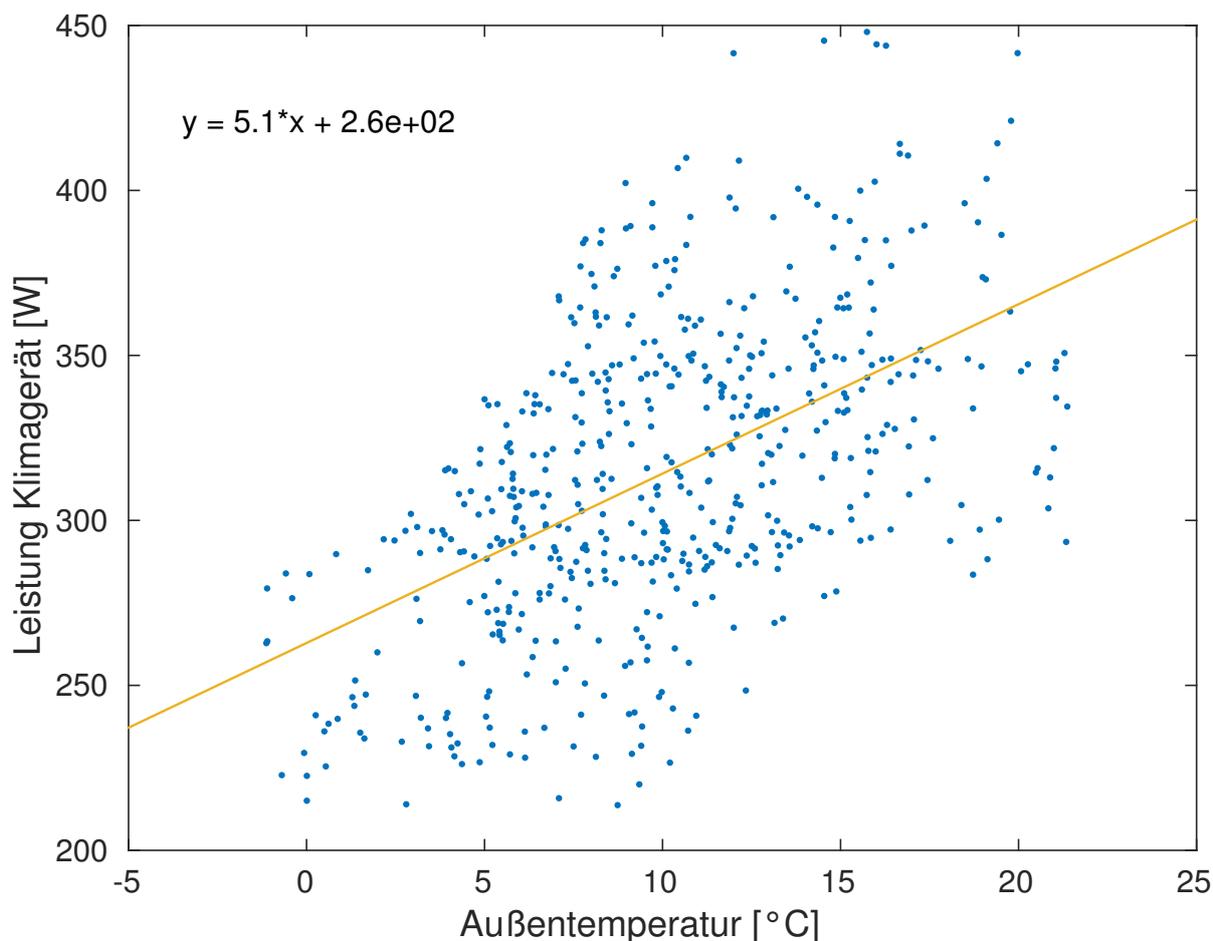


Abbildung C-11: Leistungsaufnahme des Klimageräts in Raum 10 der Verwaltung über die Außentemperatur. Das Klimagerät dient zur Kühlung der ELA.

Tabelle C-6: Identifizierte Mehrverbräuche, welche in keinem Zusammenhang zu der energetischen Sanierung stehen.

Verbraucher	P_{avg} [W]	$\frac{P_{avg}}{P_{avg,gesamt}}$ [%]
Kühlschränke und Tiefkühlschränke Haus 1	1567	12.6
Aufwärmküche Haus 1	1169	9.4
ELA R.10	394	3.2
Klimagerät R.10	317	2.5
Dataport KG R.2	132	1.1
Notstrom KG R.3	84	0.7
Brandmeldezentrale	22	0.2
Summe	3685	29.7

C.3.4 Neue Verbraucher durch die Sanierung

C.3.4.1 Klassenhäuser Aus der *Untersuchung des Stromverbrauchs der Schule Sterntalerstraße* vom 28.5.2014 ist bekannt, dass die morgendliche Spüllüftung, welche von Montag bis Freitag täglich eine Stunde lang durchgeführt wird, im Mittel 2080 W pro Haus benötigt werden. Dies ergibt für die fünf Häuser im Wochenmittel eine

Leistungsaufnahme von 310 W, was 2,5 % der gesamten Stromaufnahme der Schule entspricht.

Der selben Untersuchung sind auch die Verbrauchswerte für das Lüften im Tagbetrieb zu entnehmen. Die Werte sind in Tabelle C-7 aufgeführt und als obere Abschätzung zu verstehen, da möglicher Weise gleichzeitig mit der Lüftung auftretende Verbräuche, wie z.B. Beleuchtung, enthalten sind. Aus diesen Werten lässt sich, zusammen mit den in der GLT aufgezeichneten Signalen der Zonenklappen, der tatsächliche Stromverbrauch der Lüftungen berechnen. Dabei wurde, wie auch für den Referenzverbrauch, der zwei Wochen umfassende Zeitraum vom 9.-23.4. gewählt.

Das Ergebnis ist in Tabelle C-8 gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die Lüftung einen erheblichen Anteil des Verbrauchs der Klassenhäuser ausmacht. Aus der *Bilanzierung Energieverbrauch Schule Sterntalerstraße, 16.6.2014* ergibt sich jedoch, dass die Einsparung an Heizenergie durch den Einsatz von Wärmerückgewinnung und Geothermie bei der mechanischen Belüftung erheblich größer als der dadurch verursachte Stromverbrauch ist.

Es wird angenommen, dass der in Tabelle C-5 gezeigte Grundlastverbrauch auf die im Zuge der Sanierung eingesetzte Sensorik sowie die Motorventile der Heizkörper zurück zu führen ist, und dieser Anteil bei Haus 1 dem Mittel der Häuser 2 - 5 entspricht. Daraus ergibt sich für alle 5 Häuser in der Summe eine Leistungsaufnahme von 1404 W, was 11,3 % des gesamten Stromverbrauchs entspricht.

Tabelle C-7: Stromverbrauch durch mechanische Lüftung der Klassenhäuser.

Quelle: Untersuchung des Stromverbrauchs der Schule Sterntalerstraße (28.5.2014)

Zustand	Haus 1 [W]	Haus 2 [W]	Haus 3 [W]	Haus 4 [W]	Haus 5 [W]
Grundverbrauch	272	288	206	322	203
Morgendliches Lüften	828	2381	2208	2445	-
Morgendliches Lüften + WRG	859	2410	2317	2477	2337
1 Raum	-	834	632	-	816
1 Raum + WRG	-	890	679	700	762
2 Räume	-	1389	1122	1261	1096
2 Räume + WRG	-	1382	1441	-	1315
3 Räume	-	2218	1917	2220	2134
3 Räume + WRG	-	2520	2330	2515	2395
4 Räume	-	3112	2600	3029	3033
4 Räume + WRG	-	3422	2916	3463	3421

Tabelle C-8: Identifizierte Mehrverbräuche, welche auf die Sanierung zurück zu führen sind.

Verbraucher	P_{avg} [W]	$\frac{P_{avg}}{P_{avg,gesamt}}$ [%]
Gebäudeleittechnik KG R.2	148	1.2
Datenverteiler GVT	114	0.9
Spüllüftung Klassenhäuser	310	2.5
Lüftung Klassenhäuser 2 - 5	2126	17.1
Sensorik und Motorventile Klassenhäuser	1404	11.3
Spüllüftung Pausenhalle / Musikraum	233	1.9
Neue Technik in der Pausenhalle	353	2.8
Neue Technik in der Sporthalle	186	1.5
Unnötige Umluft Sporthalle	365-486	2.9-3.9
Summe	5239-5360	42.1-43.1

C.3.4.2 Pausenhalle und Musikraum Die morgendliche Spüllüftung von Pausenhalle und Musikraum, welche an sieben Tagen in der Woche für eine Stunde durchgeführt wird, verbraucht ca. 5600 W, was im Wochenmittel 233 W bzw. 1,9% des gesamten Stromverbrauchs entspricht. Außerdem ist zur Zeit bei alleiniger Lüftung von Musikraum oder Pausenhalle die Drehzahl der Zu- und Abluftventilatoren auf 65% gestellt, was eine Leistungsaufnahme von ca. 1500 W verursacht. bei gleichzeitiger Lüftung sind es, wie auch bei der Spüllüftung, 95% bzw. 6000 W. Es ist anzunehmen, dass der durch neu installierte Technik verursachte Grundlastverbrauch 353 W beträgt, was dem minimalen gemessenen Verbrauch entspricht. Die Differenz von 105 W zum Grundlastbedarf ohne Spüllüftung in Höhe von 458 W von wird durch Boiler und einen Kühltisch verursacht, wie in Abbildung C-12 zu sehen ist.

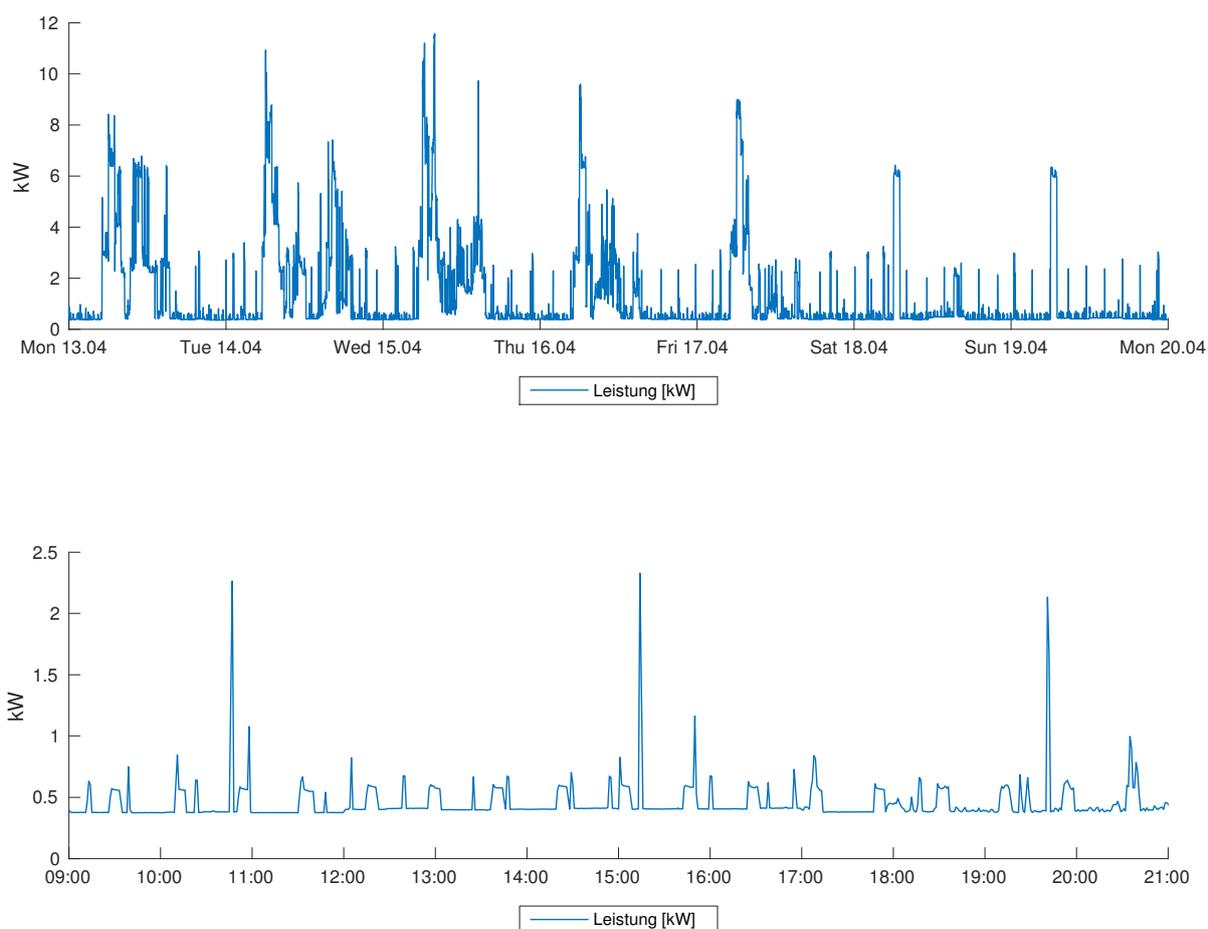


Abbildung C-12: Leistungsaufnahme von Musikraum und Pausenhalle.

Obere Grafik: Woche vom 13.-20.4.2015. Unnötige Spüllüftung am Wochenende ist deutlich zu sehen.

Untere Grafik: Grundlast am Sa. 4.4.2015. Boiler und Kühltische sind zu erkennen.

C.3.4.3 Sporthalle Als Verbrauch, welcher auf neu installierte Heizungs- und Lüftungstechnik sowie die Solarthermie und damit verbundene Sensorik zurück zu führen ist, wird als kleinster gemessener Wert im Zeitraum vom 18.-24.5.2015 angenommen, und beträgt 186 W, bzw. 1,5% des gesamten Stromverbrauchs. Einen größeren Unterschied macht aus, dass das Heizen der Sporthalle, was hauptsächlich über den Umluftbetrieb erfolgt, zur Zeit höchst ineffizient erfolgt. So ist der in der GLT

ein Sollwert für den Tagesbetrieb von 21 °C hinterlegt, die Heizkurve ist aber so niedrig eingestellt, dass sich für Außentemperaturen höher als 18 °C ein Sollwert für die Zulufttemperatur von 22 °C ergibt. Dies reicht natürlich keinesfalls aus, um die Solltemperatur zu erreichen, so dass die Lüftung nahezu während der gesamten Nutzungszeit von 5:00 - 21:45 eine Leistung von 1500 W benötigt. Bei korrekter Parametrierung würde die Solltemperatur erreicht werden und darauf hin die Umluft ausgeschaltet werden. Der beschriebene Sachverhalt ist in Abbildung C-13 dargestellt. Da die tatsächliche Laufzeit der Umluft mit korrekter Parametrierung schwierig abzuschätzen ist wird angenommen, dass die Lüftung bei richtiger Parametrierung nur 33-50 % der Nutzungszeit laufen würde. Daraus ergibt sich der in Tabelle C-8 angegebene Mehrverbrauch von 2,9-3.9 %. Zusätzlich gibt es morgens von 5:30 - 7:30 häufig einen Stromverbrauch von 4500 W. Dieser ist möglicherweise auf eine helligkeitsgesteuerte Hallenbeleuchtung zurück zu führen.

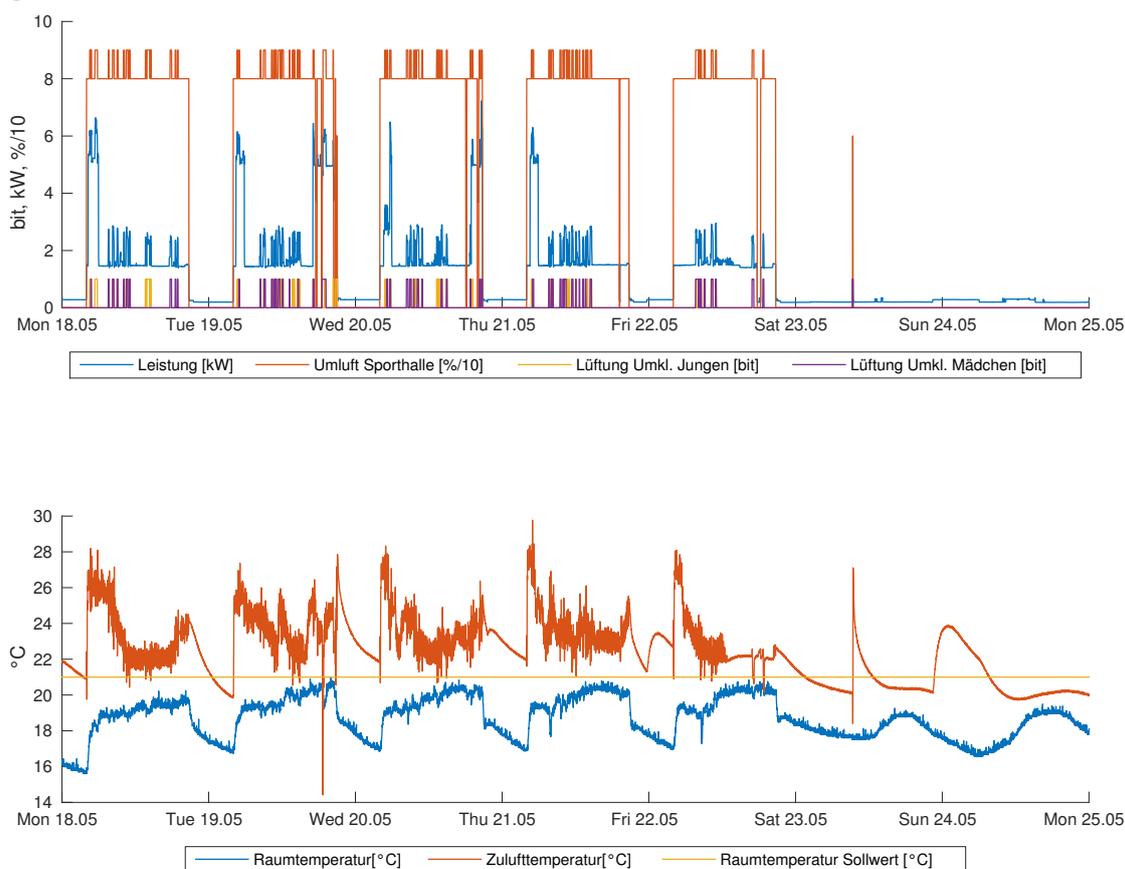


Abbildung C-13: Leistungsaufnahme der Sporthalle. Da der Sollwert der Raumtemperatur nicht erreicht wird, Läuft die Umluft während der gesamten Nutzungszeit.

C.4 Ergebnisse und Empfehlungen

Der zusätzlichen Verbrauch welcher in keinem Zusammenhang zu der energetischen Sanierung steht, beträgt 32 300 kW h bzw. 95 % bezogen auf die Referenzjahre 2007-2009 oder 31 % des aktuellen Stromverbrauchs der Schule. Den größten Unterposten macht hierbei die Aufwärmküche aus, welche zusammen mit den dort verwendet Tiefkuhlschranken 24 000 kW h verbraucht. Spätestens im Falle eines anstehenden Austauschs der Tiefkühlgeräte sollte die Anschaffung hocheffizienter Geräte in Erwägung gezogen werden, um den derzeitig unnötig hohen jährlichen Verbrauch von

Tabelle C-9: Maßnahmen zur Reduzierung des Stromverbrauchs.

Die prozentuale Angabe bezieht sich auf den derzeitigen Stromverbrauch von 105 170 kW h pro Jahr.

Maßnahme	Sparpotential [%]	[kW h]
Effiziente Tiefkühlgeräte (1/3 Verbrauch)	4.4	4630
Sparsamere ELA (1/2 Verbrauch, evtl. keine Kühlung)	3-4	3150-4200
Verkürzte Spüllüftung Klassenhäuser	2	2420
Verkürzte Spüllüftung Pausenhalle/Musikraum	1.8	1890
Parametrierung Heizung/Lüftung Sporthalle	2.9-3.9	3050-4100
Summe	14.4-16.5	15140-17240

13 800 kW h zu senken. Eine Senkung des Stromverbrauchs der Tiefkühlschränke um 2/3 sollte problemlos möglich sein. Hierdurch würden auch Folgekosten, entstehend durch die notwendige Belüftung des Raums in dem die Tiefkühlgeräte stehen, gesenkt werden.

Die Elektroakustische Anlage (ELA) verbraucht zusammen mit der dazugehörigen Klimaanlage 6200 kW h, was für sich genommen den ursprünglichen Stromverbrauch der Schule bereits um 18 % gesteigert hätte und damit der zweitgrößte neue, von der energetischen Sanierung unabhängige, Verbraucher ist. Dieser Verbrauch erscheint in Anbetracht des begrenzten Aufgabenbereichs der ELA ausgesprochen groß. Ob der Austausch der ELA durch eine effizientere Anlage wirtschaftlich ist, sollte in Erwägung gezogen werden, eine Reduzierung des Stromverbrauchs um 50 %, wodurch sich auch die Notwendigkeit der Klimatisierung des Aufstellungsraumes reduziert werden, oder sogar ganz entfallen würde. Zumindest bei der Neuschaffung von ELA in anderen Schulen sollte der Energieverbrauch, sowohl von der ELA als auch einer eventuell notwendigen Kühlung, bei den Planungen berücksichtigt werden.

Der zusätzliche Stromverbrauch, welcher in Zusammenhang mit Sanierungsmaßnahmen steht, beträgt ca. 46 000 kW h bzw. 135 % des ursprünglichen oder 43 % des aktuellen Stromverbrauchs der Schule.

Die Spüllüftung von Klassenhäusern, Pausenhalle und Musikraum war in dem ursprünglichen Energiekonzept nicht vorgesehen, sondern wurde erst nach Nutzerbeschwerden, welche sich auf den morgendlichen Geruch in den Räumen bezogen, eingeführt. Da die Räumlichkeiten inzwischen nicht mehr neu sind, sollte die Geruchsbelastung durch ausdünstende Möbel und andere Materialien stark zurück gegangen sein. Wir schlagen daher vor, die Spüllüftung probeweise nur Montag, und dann auch nur 20 anstelle von 60 Minuten durchzuführen. Dies würde 4,1 % des derzeitigen bzw. 12,7 % des ursprünglichen Stromverbrauchs sparen. Hierzu müsste die GLT entsprechend angepasst werden, so dass Dauer und Wochentage der Spüllüftung durch den Hausmeister einstellbar werden.

Außerdem sollte die Drehzahl für die alleinige Lüftung des Musikraums reduziert werden. Die Drehzahl für die kombinierte Lüftung von Musikraum und Pausenhalle sollte ebenfalls, zumindest testweise, reduziert werden. Dies ist mit der bestehenden Konfiguration der GLT bereits möglich.

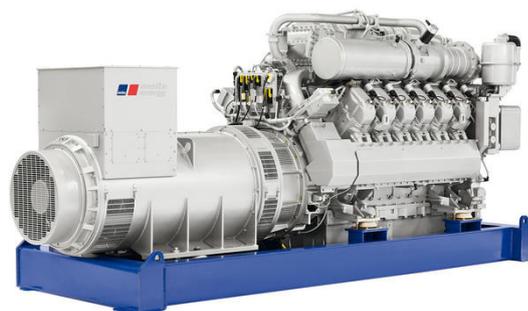
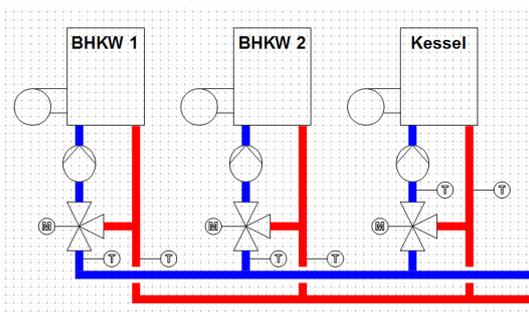
Die korrekte Parametrierung der Lüftung/Heizung in der Sporthalle sollte 2,9 % to 3,9 % des aktuellen Stromverbrauchs einsparen und ist ebenfalls ohne Investitionen möglich. Der bereits ohne Spüllüftung durch die mechanische Lüftung der Klassenhäuser ent-

stehende Stromverbrauch von 18 600 kWh bzw. 17 % des gesamten aktuellen Stromverbrauchs ist zwar viel, sorgt aber für eine zuverlässig hohe Luftqualität und spart durch die Wärmerückgewinnung und die Vermeidung unnötigen Lüftens so viel Heizenergie, dass der Mehrverbrauch an elektrischer Energie gerechtfertigt ist.

Die Grundlast der Klassenhäuser 1 - 5, welche mutmaßlich durch neu verbaute Sensorik, Motorventile und Datenverarbeitung entsteht ist, auch wenn der Küchenbetrieb mit den Kühl- und Gefrierschränken herausgerechnet wird, mit 12 300 kWh ein auffällig großer Posten. Im Rahmen dieser Untersuchung kann jedoch nicht geklärt werden, auf welche Komponenten dieser hohe Stromverbrauch zurück zu führen ist, da die Messungen in der Hauptverteilung lediglich die gesamten Verbrauch der Unterverteilung der Klassenhäuser erfassen können und dies keine hinreichend genauen Schlüsse auf die einzelnen Verbraucher in den Klassenhäusern zulässt. Da der Grundlastverbrauch der Klassenhäuser 11,3 % des gesamten aktuellen Stromverbrauchs ausmacht, schlagen wir eine exemplarische Untersuchung durch eine Messung an der Unterverteilung eines Klassenhauses vor. Dies könnte die Ursachen für den hohen Grundlastbedarf auf spezifische Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung und die eingesetzte Messtechnik zurück zu führen, mit dem Ziel mögliche Minimierungsstrategien zu entwickeln. Das gleiche gilt im Prinzip auch für den Grundlastbedarf von Pausenhalle, Musikraum und Sporthalle, wobei bei den Klassenhäusern aufgrund der identischen Bauweise das Verhältnis von Mess- und Analyseaufwand zu möglichen Einsparungen am günstigsten ist.

D Vorschlag Masterarbeit an der HAW

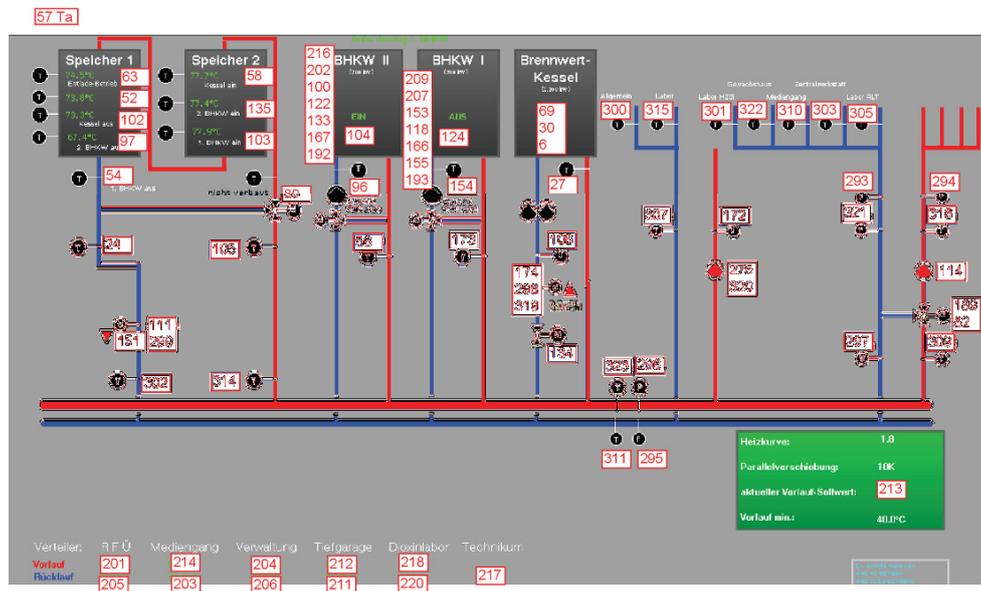
BHKWs kostenoptimal betreiben



- EMPC
- Versorgungssicherheit
- Laufzeiten
- Reduzierung Spitzenlast Strom
- Minimierung Speicherverluste



Schema und Datenpunkte

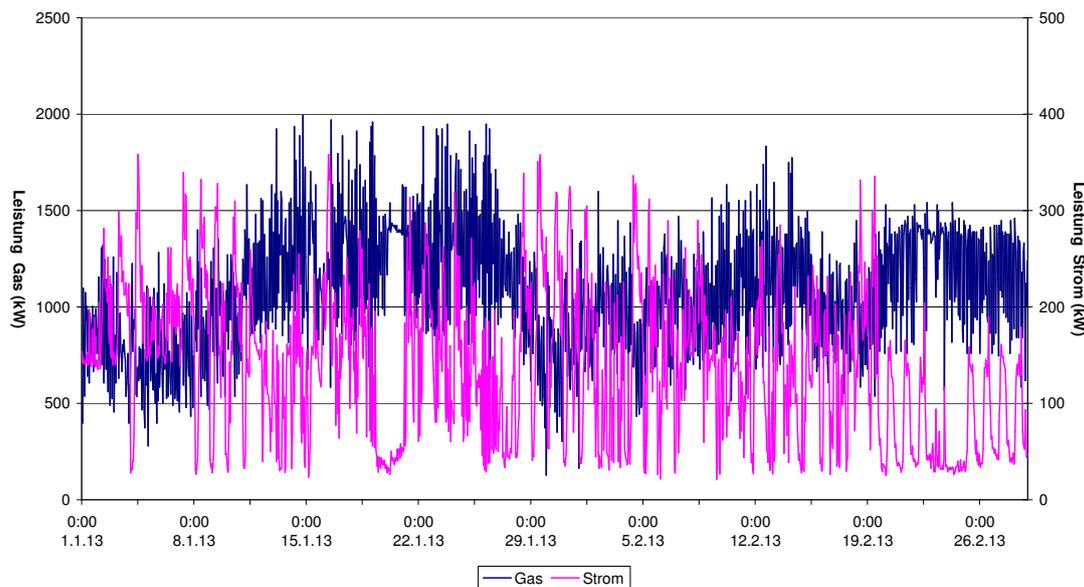


- mit Nummern versehene Messpunkte sind in der Datenbank verfügbar

Daten Strom und Gas



LANUV Essen
Gas- + Stromverbrauch Januar + Februar 2013



- Daten von Strom- und Gaszähler können nachträglich beim Lieferanten angefragt werden

Aktuelle Regelung



- BHKW und Kessel werden nach Speichertemperaturen ein- bzw. ausgeschaltet
- Konstante Sollvorlauftemperaturen
- Regelung Kesselleistung nach Speichertemperatur („Speicher immer halbvoll“)

Ziele



- Prüfen ob und mit welcher Regelung Spitzenlasten im Stromverbrauch gesenkt werden können
- Prüfen ob mit verbesserter Regelung längere Laufzeiten und weniger Schaltvorgänge von BHKW und Kessel erreicht werden können
- Prüfen ob Speicherverluste verringert werden können
- Möglichkeiten die Anlage zu regeln: BHKW / Kessel an und ausschalten; Kessel Volumenstrom und Sollvorlauftemperatur; Sollvorlauftemperatur Verbraucher

Aufgabe

- Betriebskosten nach oben genannten Punkten optimieren

Ansätze

- Verbrauchsprofil (Strom, Gas) für Vorhersage nutzen

Einschränkungen

- (Versorgungssicherheit ist sehr wichtig)
- Verbraucher schlecht hydraulisch abgeglichen
- BHKW dürfen nicht mit Rücklauftemperaturen $> 60^{\circ}\text{C}$ arbeiten