

OBSERVE

Arbeitspaket AP A.5

Implementierung und Evaluation in Gebäudeautomationssystemen

Michael Boeck, Johannes Buchholz,
Henrik Przybilla, André Wolfram

boeck@kieback-peter.de
buchholz@kieback-peter.de
przybilla@kieback-peter.de
wolfram@kieback-peter.de

Kieback&Peter GmbH & Co. KG
Tempelhofer Weg 50, 12347 Berlin

Datum: 25.06.2018

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kieback&Peter

Inhaltsverzeichnis

8.1 Inhalte des Arbeitspaketes A.5	2
8.1.1 Ziele und Vorgehen	2
8.1.2 Überblick	3
8.2 Implementierung und Evaluation	4
8.2.1 Übersicht	4
8.2.2 Optimierungsmaßnahmen in den Berliner Demonstrationsgebäuden	4
8.2.3 Demonstrator modellbasierte prädiktive Regelung	5
8.2.3.1 AMPC-SL	5
8.2.3.1.1 Testumgebung und Implementierung	5
8.2.3.1.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	12
8.2.3.2 MPC und datenbasierter ILC	20
8.2.3.2.1 Bereitstellung von Wetterprognosen	21
8.2.3.2.2 Beschreibung des Teststandes	23
8.2.3.2.3 Realisierung am Teststand	26
8.2.3.2.4 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	28
8.2.3.3 EMPC	30
8.2.3.3.1 EMPC-Testszenarien	30
8.2.3.3.2 Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale	35
8.2.3.3.3 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	37
8.2.4 Demonstrator Fehlererkennung	43
8.2.4.1 Qualitative Modelle (QuaMo)	43
8.2.4.1.1 Testumgebung und Implementierung	43
8.2.4.1.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	45
8.2.4.2 Regelbasierte Fehlererkennung	55
8.2.4.2.1 Testumgebung und Implementierung	55
8.2.4.2.2 Beschreibung der Regeln	63
8.2.4.2.3 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	75
8.3 Zusammenfassung und Ausblick AP A.5	81
Anhang A	85

8 Implementierung und Evaluation in Gebäudeautomationssystemen

8.1 Inhalte des Arbeitspaketes A.5

8.1.1 Ziele und Vorgehen

Zu den Zielen, die im Projekt OBSERVE in dem von Kieback&Peter geleiteten Arbeitspaket A.5 erreicht werden sollten, zählten die Schaffung geeigneter Demonstrationsumgebungen und die Beteiligung am Aufbau einer angemessenen Infrastruktur für die Durchführung gemeinsamer Pilotprojekte mit den Projektpartnern.

Damit sollten zum einen die neuen Ansätze, die von den Projektpartnern auf wissenschaftlicher Ebene untersucht wurden, für eine Implementierung in Gebäudeautomationssystemen vorbereitet werden.

Zum anderen sollten die Voruntersuchung und die Evaluation ausgewählter Methoden in bestehenden Gebäudeautomationssystemen in Kooperation mit den Projektpartnern durchgeführt werden.

Hierzu wurden die Projektpartner je nach Zielsetzung und Projektschwerpunkt mit entsprechender hauseigener Gerätetechnik von Kieback&Peter, wie DDC-Automationsstationen und speziell vorbereiteten Funk-Raumregelsystemen, Tools, Spezifikationen und Interfacebeschreibungen ausgestattet. Damit wurde den Projektpartnern frühzeitig die Möglichkeit gegeben, auch eigene Labor- und Testumgebungen zur Nutzung für die Evaluationsphase aufbauen zu können. Darüber hinaus wurden den Projektpartnern auch praxisbezogene Empfehlungen für den Einsatz geeigneter Kommunikationskomponenten, insbesondere im Bereich BACnet (Building Automation and Control Networks) gegeben.

Weiterhin wurde den Projektpartnern von Kieback&Peter in Zusammenarbeit mit der Firma „IngSoft GmbH“ kontinuierlich während der gesamten Projektlaufzeit Zugriff auf ausgewählte Datenpunkte aus zwei typischen Bürogebäuden in Berlin ermöglicht, um diese als Demonstrationsanlagen zur Methodenevaluierung im Projekt nutzen zu können. Die Demonstrationsanlagen werden in diesem Bericht als „Demonstrationsgebäude der DKB“ und „Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale“ bezeichnet. Zusätzlich wurden in diesen Demonstrationsanlagen in Abstimmung mit den Projektpartnern von Kieback&Peter energetische Betriebsoptimierungen ausgearbeitet, und die weitere Ausrüstung dieser Anlagen mit erforderlicher Mess- und Automatisierungstechnik im Bedarfsfall vorgenommen bzw. unterstützt (siehe Kapitel 8.2.2).

Auf methodischer Ebene sollte im Projekt OBSERVE die Anbindung bzw. Implementierung ausgewählter Methoden der Projektpartner an die Gebäudeautomationssysteme zu Demonstrationszwecken vorgenommen werden können.

Darauf basierend wurde im Projektverlauf die mit den Projektpartnern gemeinsam abgestimmte und nachfolgend beschriebene Vorgehensweise gewählt.

Für den Projektschwerpunkt „Modellbasierte, lernfähige, prädiktive Regelung“ wurde ein Konzeptvorschlag für ein flexibel einsetzbares Testszenario („autarker Heizkreis für einen typischen Büroraum“) mit einer DDC als „Gateway-Lösung“ erstellt und umgesetzt. Details zum Aufbau des Teststandes, zur Methodenintegration, den dabei genutzten Kommunikationsschnittstellen und den erprobten Regelungsstrategien sind in den Kapiteln 8.2.3.2 und 8.2.3.3 zu finden. Die damit unter Laborbedingungen gewonnenen Umsetzungserfahrungen mit den Regelungsstrategien erwiesen sich insbesondere für die anschließend durchgeführten Tests innerhalb von Heizkreisen des Demonstrationsgebäudes als wertvolle Realisierungshilfe (siehe Kapitel 8.2.3.3).

Für den Projektschwerpunkt „Modellbasierte Fehlererkennung“ wurde zur Implementierung und Evaluation ausgewählter Methoden, wie z.B. dem vom Fraunhofer ISE bereitgestellten QuaMo-Verfahren, ein Konzeptvorschlag erarbeitet und umgesetzt. Details hierzu können den Kapiteln 8.2.4.1.1 und 8.2.4.2.1 entnommen werden. Dabei erwies sich das aufgebaute „Demonstratormodul Fehlererkennung“ im Rahmen der hierfür etablierten Testumgebung als flexibel einsetzbar und konnte auch als Implementierungsgrundlage für eine weitere in Kooperation mit dem Projektpartner HAW Hamburg erprobte Regelungsstrategie genutzt werden („Demonstratormodul Regelung“; siehe Kapitel 8.2.3.1).

Die gemeinsam von Kieback&Peter und verschiedenen Projektpartnern während des Projektes untersuchten Methoden werden in den nachfolgenden Kapiteln im Einzelnen vorgestellt.

8.1.2 Überblick

In **Kapitel 8.2** werden nach einer kurzen Kapitelübersicht (siehe Kapitel 8.2.1) zunächst die im Projektverlauf von Kieback&Peter in den Demonstrationsgebäuden in Berlin ausgeführten Nachrüstungs-, Wartungs- und Optimierungsmaßnahmen übersichtsartig dargestellt (siehe Kapitel 8.2.2).

Anschließend werden die zur Lösung der Demonstratoraufgaben im Projekt von Kieback&Peter in den Bereichen „Modellbasierte, lernfähige, prädiktive Regelung“ (siehe Kapitel 8.2.3) und „Fehlererkennung“ (siehe Kapitel 8.2.4) ausgeführten Arbeiten beschrieben.

Kapitel 8.3 fasst die in Kapitel 8 gewonnenen Erkenntnisse aus Sicht von Kieback&Peter zusammen, und bietet einen Ausblick auf identifizierte Herausforderungen im Hinblick auf die praktische Einsetzbarkeit der erprobten Methoden in Gebäudeautomationssystemen.

Anhang A enthält eine vom Projektpartner HAW Hamburg bereitgestellte Zusammenfassung einer Masterarbeit zur Kopplung eines Simulationsmodells mit einer DDC-Automationsstation aus einer frühen Projektphase.

8.2 Implementierung und Evaluation

8.2.1 Übersicht

In **Kapitel 8.2.2** sind übersichtsartig die wesentlichen Nachrüstungs-, Wartungs- und Optimierungsmaßnahmen und deren Auswirkungen beschrieben. Die Grundlage dafür waren Voruntersuchungen mit den Projektpartnern Fraunhofer ISE, Plenum Ingenieurgesellschaft (siehe AP B.5) und Fa. IngSoft GmbH.

Kapitel 8.2.3 fasst die Arbeiten von Kieback&Peter zusammen, die zum Zwecke der Erprobung verschiedener von der HAW Hamburg vorgeschlagener modellprädiktiver Regelungskonzepte (AMPC-SL, MPC und datengetriebener ILC, EMPC; siehe AP A.4 und AP B.4) durchgeführt wurden. Die Erprobung wurde sowohl in einer Laborumgebung, als auch in einer realen Anlage durchgeführt. Der Schwerpunkt der Betrachtungen in diesem Kapitel liegt dabei auf der Beschreibung des Aufbaus der jeweiligen Testumgebungen, der erforderlichen Installationsarbeiten und der im Rahmen der Versuchsdurchführungen verwendeten Komponenten, Funktionsbausteine und Kommunikationsschnittstellen. Eine ausführliche Darstellung der theoretischen Grundlagen und Detailauswertungen zu den Versuchsergebnissen ist in den Berichten zum AP A.4 sowie AP B.4 zu finden.

In **Kapitel 8.2.4** wird zunächst die Implementierung und Inbetriebnahme der vom Projektpartner Fraunhofer ISE bereitgestellten Routinen für die Erprobung Qualitativer Modelle (QuaMo) zur Fehlererkennung innerhalb der von Kieback&Peter aufgebauten Testumgebung beschrieben. In Kapitel 8.2.4.1.2 werden anschließend ausgewählte Testergebnisse vorgestellt, die sowohl auf Grundlage simulierter Fehlersituationen, als auch im täglichen Anlagenbetrieb in der Heizperiode 2017/2018 erzielt werden konnten.

Abschließend wird zur automatisierten Fehlererkennung in Kapitel 8.2.4.2 die Implementierung eines regelbasierten Systems innerhalb der Testumgebung von Kieback&Peter und dessen Nutzung u. a. im realen Anlagenbetrieb des Demonstrationsgebäudes beschrieben.

8.2.2 Optimierungsmaßnahmen in den Berliner Demonstrationsgebäuden

Im Folgenden werden die Optimierungsmaßnahmen innerhalb der Berliner Demonstrationsgebäude stichpunktartig dargestellt. Hierzu werden Nachrüstungs- und Wartungsarbeiten, sowie manuelle Optimierungsmaßnahmen innerhalb der Demonstrationsgebäude dargestellt, deren Auswirkungen und Ergebnisse in den jeweiligen Arbeitspaketen der Projektpartner dokumentiert sind (siehe AP 2, AP B.4, AP B.5, AP A.4).

Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale

In diesem Gebäude wurde auf Grund der Projektaufgaben, insbesondere im Bereich der modellprädiktiven Regelungsmethoden (Kapitel 8.2.3), die Erfassung zusätzlicher Datenpunkte notwendig. Dazu wurden in der Kesselanlage Fühler nachgerüstet, die

zur Methodenevaluierung von den Projektpartnern benötigt wurden. Für die Modellvalidierung wurden z.B. für alle Verbraucherkreise Wärmemengenzähler implementiert, die auch zur Bilanzierung des Gebäudes herangezogen werden konnten. Es erfolgte darüber hinaus ein Austausch der Stromzähler gegen ein anderes Fabrikat. Für die Demonstratoraufgaben im Bereich der AMPC/EMPC-Methodenevaluierung musste ein Raumfühler pro Etage zur Verfügung gestellt werden.

Darüber hinaus wurde eine automatisierte und kontinuierliche Bereitstellung der Wettervorhersagedaten etabliert. Die jeweils relevanten Datenpunkte mussten zur Bereitstellung für die Projektpartner auf die GLT aufgeschaltet werden. Die Planung, Koordination und auch die Integration der notwendigen Maßnahmen wurden von Kieback&Peter realisiert.

Demonstrationsgebäude der DKB

In dem Gebäude der DKB wurden Wärme- und Kältemengenzähler für Verbraucherkreise nachgerüstet. Ausfälle einiger Wärmemengenzähler mussten vor Ort durch Modulaustausch behoben werden. Einen großen Stellenwert hatte die Betriebsoptimierung in diesem Objekt. Hierzu wurden durch Kieback&Peter umfangreiche Analysen im Gebäude der DKB durchgeführt. Dabei konnten Fehler und Schwachstellen identifiziert werden, die recht unterschiedliche Ursachen hatten. So wurden oftmals vom Betreiber temporäre Sollwertvorgaben eingestellt, die zu einem Mehrverbrauch von Energie führten, und nicht mehr zurückgenommen wurden. Es wurden die tatsächlich gewünschten Nutzzeiten des Gebäudes mit dem Betreiber neu abgestimmt, um nur einige Beispiele zu benennen. Die wesentlichen Realisierungen zu den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen und deren Auswirkungen werden im AP B5 ausführlich behandelt.

8.2.3 Demonstrator modellbasierte prädiktive Regelung

8.2.3.1 AMPC-SL

In diesem Kapitel werden die Integration und die Inbetriebnahme des adaptiven, modellprädiktiven Reglers mit sukzessiver Linearisierung (AMPC-SL) des Projektpartners HAW Hamburg beschrieben. Die Erprobung erfolgte innerhalb einer von Kieback&Peter aufgebauten Testumgebung sowie in einem Heizkreis des Demonstrationsgebäudes „Kieback&Peter-Zentrale“.

8.2.3.1.1 Testumgebung und Implementierung

Zur Evaluation des adaptiven MPC mit sukzessiver Linearisierung (siehe Beschreibung zum Arbeitspaket A.4) unter realen Einsatzbedingungen im Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale wurde ein Integrationskonzept für die Erprobung der vom Projektpartner HAW Hamburg unter Matlab/Simulink entwickelten AMPC-SL-Modellroutinen erstellt und umgesetzt. Vereinfachend wird in den nachfolgenden Kapiteln von „AMPC-SL-Modell“ gesprochen, wobei damit der gesamte prädiktive Regleralgorithmus inklusive dem intern verwendeten Modell gemeint ist.

Kernelement des Integrationskonzeptes ist der in Abbildung 8.2.3-1 gezeigte, flexible Aufbau bestehend aus:

- Einer Automationsstation DDC4200e, eingebaut in einem transportablen Einsatzrahmen, mit BACnet/IP-Verbindung zur Anlagentechnik des Demonstrationsgebäudes über das hausinterne MSR-Netz und
- Einem „Demonstratormodul Regelung“ (in Abbildung 8.2.3-1 orange markiert) für
 - die Abarbeitung der AMPC-SL-Modellroutinen,
 - das Einlesen der vom Regler benötigten Mess- und Vorhersagewerte sowie die Bereitstellung des vom Regler bestimmten Stellgrößenwertes (Vorlaufsollltemperatur des ausgewählten Heizkreises).

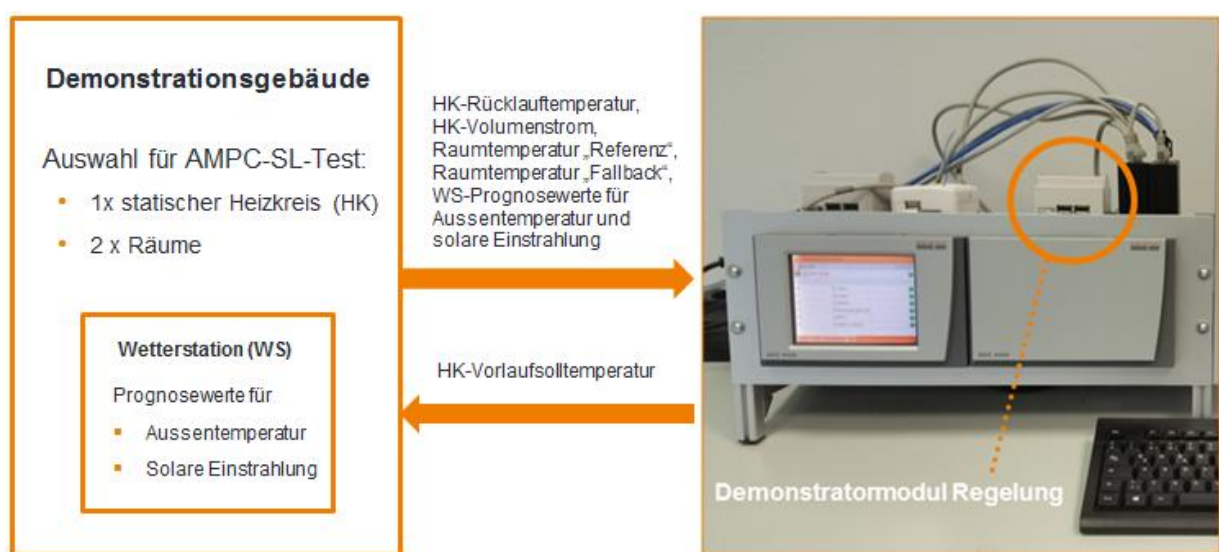


Abbildung 8.2.3-1: Testumgebung für AMPC-SL-Tests im Demonstrationsgebäude

Der Aufbau des „Demonstratormoduls Regelung“ erfolgte hinsichtlich der Basis-Hardware- und Softwareausstattung analog zum „Demonstratormodul Fehlererkennung“ (Raspberry Pi 3 im Hutschienengehäuse + Python; siehe Kapitel 8.2.4.1.1).

Zur Ermittlung der Gebäudetemperatur des im AMPC-SL verwendeten „Ein-Zonen-Modells“ wurde ein nach Norden ausgerichteter Raum ausgewählt. Da über diese Temperatur die Abweichung zur vorgegebenen Referenzraumtemperatur zur Berücksichtigung in der Kostenfunktion bestimmt wird, wird im nachfolgenden Text auch von „Referenzraum“ gesprochen. Es handelt sich jedoch nur um einen typischen Büroraum, der zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführungen unbenutzt war.

Zusätzlich wurde die Temperatur in einem zweiten, ebenfalls nach Norden ausgerichteten Raum erfasst. Dieser Raum hatte eine zwei Kelvin niedrigere Nutzungstemperatur. Diese Raumtemperatur wurde zur Realisierung einer Sicherheitsfunktion („Fallback-Strategie“) verwendet. Hierfür wurde eine Projektierungs-lösung direkt auf der regelnden DDC in der Anlage des Demonstrationsgebäudes („Schaltschrank-DDC“) in der Form implementiert, dass bei Unterschreitung eines

parametrierten Grenzwertes von 17 °C, automatisch eine Zwangsumschaltung auf die zuvor genutzte witterungsgeführte Vorlauftemperaturregung erfolgt wäre.

Zur Erfassung der Temperaturen in den beiden Räumen wurden Raumtemperaturfühler TCF321-FTL von Kieback&Peter verwendet, die mit Hilfe von Funk-BACnet/IP-Gateways an die DDC-Automationsstationen in der Testumgebung (Raumtemperatur im „Referenzraum“, T_{ra}) und im Schaltschrank der Anlage des Demonstrationsgebäudes (Raumtemperatur für Fallback-Strategie, $T_{ra.fb}$) übermittelt wurden.

Zum Empfang der vom AMPC-SL-Modell benötigten Prognosedaten (Außentemperatur und solare Einstrahlung) wurde eine Wetterprognosestation „WS-K Modbus“ der Fa. HKW installiert, und die DDC der Testumgebung zur Datenaufnahme entsprechend vorbereitet. Die Übertragung der Prognosedaten des aktuellen und des folgenden Tages von der Wetterprognosestation an die DDC erfolgte dabei mit Hilfe eines Modbus-BACnet/IP-Gateways.

Zur Aufnahme der weiteren vom AMPC-SL-Regler benötigten Eingangsgrößen wurden die entsprechenden Messdatensignale (Rücklauftemperatur T_{ret} und Volumenstrom $\dot{V}$ aus dem ausgewählten Heizkreis) über das hausinterne MSR-Netz auf die DDC-Automationsstation in der Testumgebung aufgeschaltet.

Der vom AMPC-SL-Modell bestimmte Ausgabewert (Vorlaufsolltemperatur $T_{sup.sp}$ für den ausgewählten Heizkreis) wurde über die DDC im Testaufbau mit dem passenden Eingang des für die Heizkreisregelung zuständigen Softwarebausteins ($T_{sup.ext}=T_{sup.sp}$) auf der DDC in der Anlage des Demonstrationsgebäudes verknüpft. Zusätzlich wurde dabei auch der zulässige Wertebereich begrenzt ([20,100] °C).

Das „Demonstratormodul Regelung“ wurde auf eine Hutschiene im Testaufbau montiert und mit der DDC netzwerkseitig verbunden. Für Implementierung, Analyse und Debugging wurden weiterhin noch Monitor, Maus und Tastatur an das Demonstratormodul angeschlossen.

In der Gesamtheit bestand die Testumgebung für die AMPC-SL-Tests damit aus den folgenden Komponenten:

- Automationsstation DDC4200e inklusive der für die AMPC-SL-Tests erforderlichen Anlagenprojektierung
- „Demonstratormodul Regelung“
- Zwei Funk-Raumfühler TCF321-FTL, zur Erfassung der Raumtemperatur im „Referenzraum“ und zur Aktivierung der Sicherheitsfunktion „Rückschaltung auf konventionelle Regelungsstrategie bei Grenzwertunterschreitung“ zzgl. zweier Funk-BACnet IP-Gateways für die DDC-Anbindung in der Testumgebung und im Schaltschrank
- Wetterprognosestation zum Empfang von Vorhersagewerten für die Außentemperatur und die solare Einstrahlung zzgl. Modbus-BACnet/IP-Gateway für die DDC-Anbindung
- Netzwerk-Hardware, Maus, Monitor und Tastatur

Um die AMPC-SL-Regelungsstrategie einfach mittels manueller Umschaltung zur Nutzung im vorausgewählten Heizkreis aktiv oder inaktiv schalten zu können, wurde

innerhalb der Kundenebene auf der „Schaltschrank-DDC“ hierfür eine eigene Schalterbedienung realisiert (siehe Abbildung 8.2.3-2).

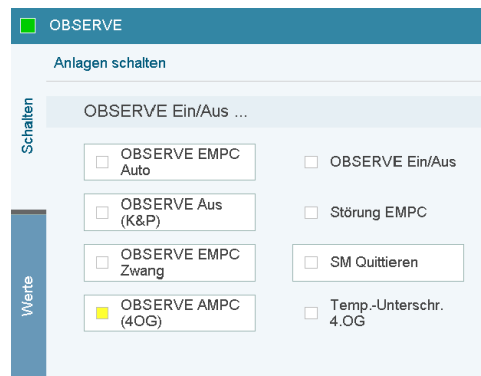


Abbildung 8.2.3-2: Freigabe der AMPC-SL-Regelungsstrategie in der Kundenebene

Bei Betätigung des Schalters „OBSERVE AMPC“ wird die AMPC-SL-Regelungsstrategie für den vorausgewählten Heizkreis im Demonstrationsgebäude aktiv geschaltet und gleichzeitig die ursprünglich installierte Nachtabsenkung deaktiviert.

Die vom Projektpartner HAW Hamburg bereitgestellten und zur Nutzung auf dem Demonstratormodul bereits vorkompilierten Modellroutinen wurden jeweils nach Erhalt und in Abstimmung mit dem Projektpartner vor einer neuen Testdurchführung auf das Modul aufgespielt.

Für die Kommunikation zwischen dem AMPC-SL-Modell und der DDC im Testaufbau wurde eine Schnittstellenspezifikation mit dem Projektpartner vereinbart und auf dem Demonstratormodul in der Programmiersprache Python implementiert („Gateway“).

Die Daten, die von der DDC im Testaufbau vom „Gateway“ nach einem durch das AMPC-SL-Modell ausgelösten Abfrageimpuls (Minutentaktung) via BACnet/IP eingelesen wurden, sind in Abbildung 8.2.3-3 dargestellt. Dabei handelt es sich um die erforderlichen Messdatensignale (Raumtemperatur im „Referenzraum“, Rücklauftemperatur und Volumenstrom aus dem ausgewählten Heizkreis) sowie die benötigten Prognosewerte (Außentemperatur und solare Einstrahlung). Um aus der Gesamtheit der Prognosewerte (aktueller Tag und Folgetag) die nachfolgenden Prognosewerte ab der aktuellen Stunde extrahieren zu können, wurde zusätzlich auch noch die Stunde der Funkuhrzeit der Wetterprognosestation mitübertragen.

Die modulintern via UDP (User Datagram Protocol) vom Gateway an das AMPC-SL-Modell übertragenen Eingabewerte sind in Abbildung 8.2.3-4 dargestellt. Es handelt sich dabei um die Messdaten aus dem Heizkreis und dem „Referenzraum“, sowie 24 Prognosewerte für die Außentemperatur orientiert an den Tagesstunden (0,1,...,23; ab der aktuellen Stunde für die nächsten 23 Stunden) und 4 Prognosewerte für die solare Einstrahlung orientiert an den Tagesvierteln (0-6, 6-12, 12-18, 18-24 Uhr; ab dem aktuellen Tagesviertel für die nächsten 3 Tagesviertel). Da im AMPC-SL-Modell mit Temperaturen in Kelvin gerechnet wurde, erfolgte zusätzlich noch vor der Sendung eine Konvertierung der Temperaturwerte (Wert in Kelvin = Wert in Grad Celsius + 273,15).

Nr.	Bezeichnung	Einheit
1	Rücklauftemperatur des ausgewählten Heizkreises	°C
2	Raumtemperatur des „Referenzraumes“	°C
3	Volumenstrom im ausgewählten Heizkreis	m³/h
4	Außentemperaturprognose, aktueller Tag, 00:00..00:59 Uhr	°C
5	Außentemperaturprognose, aktueller Tag, 01:00..01:59 Uhr	°C
...	...	...
27	Außentemperaturprognose, aktueller Tag, 23:00..23:59 Uhr	°C
28	Außentemperaturprognose, Folgetag, 00:00..00:59 Uhr	°C
29	Außentemperaturprognose, Folgetag, 01:00..01:59 Uhr	°C
...	...	...
51	Außentemperaturprognose, Folgetag, 23:00..23:59 Uhr	°C
52	Solarstrahlungsprognose, aktueller Tag, 00:00..05:59 Uhr	W/m²
53	Solarstrahlungsprognose, aktueller Tag, 06:00..11:59 Uhr	W/m²
54	Solarstrahlungsprognose, aktueller Tag, 12:00..17:59 Uhr	W/m²
55	Solarstrahlungsprognose, aktueller Tag, 18:00..23:59 Uhr	W/m²
56	Solarstrahlungsprognose, Folgetag, 00:00..05:59 Uhr	W/m²
57	Solarstrahlungsprognose, Folgetag, 06:00..11:59 Uhr	W/m²
58	Solarstrahlungsprognose, Folgetag, 12:00..17:59 Uhr	W/m²
59	Solarstrahlungsprognose, Folgetag, 18:00..23:59 Uhr	W/m²
60	Aktuelle Stunde (Quelle: Funkuhr der Wetterstation)	h

Abbildung 8.2.3-3: Kommunikationsschnittstelle – DDC⇒Gateway

Nr	Bezeichnung	Einheit
1	Rücklauftemperatur des ausgewählten statischen Heizkreises	K
2	Raumtemperatur im „Referenzraum“	K
3	Volumenstrom im ausgewählten Heizkreis	m³/h
4	Außentemperaturprognose für die akt. Stunde	K
5	Außentemperaturprognose für die akt. Stunde + Offset 1 h	K
...	...	...
27	Außentemperaturprognose für die akt. Stunde + Offset 23 h	K
28	Solarstrahlungsprognose für das akt. „Tagesviertel“ (TV)	W/m²
29	Solarstrahlungsprognose für das akt. „Tagesviertel“ + Offset 1 TV	W/m²
30	Solarstrahlungsprognose für das akt. „Tagesviertel“ + Offset 2 TV	W/m²
31	Solarstrahlungsprognose für das akt. „Tagesviertel“ + Offset 3 TV	W/m²

Abbildung 8.2.3-4: Kommunikationsschnittstelle – Gateway⇒AMPC-SL-Modell

Der vom AMPC-SL-Modell errechnete Stellgrößenwert (Vorlaufsolltemperatur $T_{sup.sp}$) wurde einen Abtastschritt nach Erhalt der Eingabegrößen modulintern per UDP an das Gateway kommuniziert und von dort via BACnet/IP über die DDC im Testaufbau zur Ansteuerung des ausgewählten Heizkreises versendet.

Die beschriebene Programmablaufsteuerung im Gateway ist in Abbildung 8.2.3-5 zusammenfassend dargestellt.

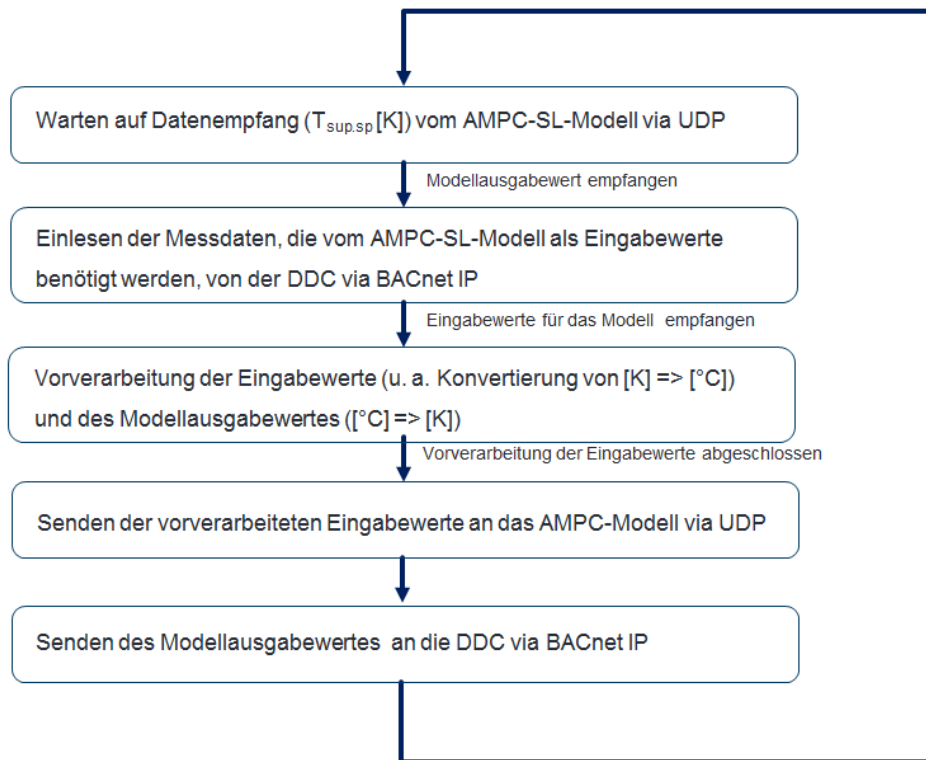


Abbildung 8.2.3-5: Programmablaufsteuerung im „Gateway“

Für Analyse- und Debugging-Zwecke wurde vom AMPC-SL-Modell in jedem Abtastschritt eine Logdatei auf dem Demonstratormodul abgespeichert. Die dabei aufgezeichneten Größen sind in Abbildung 8.2.3-6 dargestellt.

Wie man der Abbildung 8.2.3-6 entnehmen kann, sind darin u. a. der Vorgabewert für die Referenzraumtemperatur und die im AMPC-SL-Modell implementierten Bereichsgrenzen für die Raumtemperatur im „Referenzraum“ enthalten, sowie die Werte der vom AMPC-SL-Modell verwendeten Wichtungsfaktoren (siehe hierzu auch die Kostenfunktion in AP A.4 / Kapitel 6.4.3 „Anwendungsbeispiel“).

Nr.	Bezeichnung	Einheit
1	Simulationszeit	s
2	Uhrzeit, Stunde	h
3	Uhrzeit, Minute	min
4	Uhrzeit, Sekunde	s
5	Rücklauftemperatur des ausgewählten Heizkreises	K
6	Raumtemperatur des „Referenzraumes“	K
7	Volumenstrom im ausgewählten Heizkreis	m³/h
8	Außentemperaturprognose für die akt. Stunde	K
...	...	...
31	Außentemperaturprognose für die akt. Stunde + Offset 23h	K
32	Solarstrahlungsprognose für das akt. „Tagesviertel“	W/m²
...	...	...
35	Solarstrahlungsprognose für das akt. „Tagesviertel“ + Offset 3	W/m²
36	Vom Modell berechnete Sollvorlauftemperatur (interne Verwendung)	K
37	Volumenstrom im ausgewählten Heizkreis	m³/s
38	Außentemperaturprognose für die akt. Stunde, interpoliert	K
39	Solarstrahlungsprognose für das akt. „Tagesviertel“, interpoliert	W/m²
40	Referenztemperaturvorgabe für den „Referenzraum“	K
41	Simulierte Uhrzeit, Stunde	h
42	Simulierte Uhrzeit, Minute	min
43	Vom Modell berechnete und ausgegebene Sollvorlauftemperatur	K
44	Untergrenze für die Raumtemperatur des „Referenzraumes“	K
45	Obergrenze für die Raumtemperatur des „Referenzraumes“	K
46	Wichtungsfaktor Q1	-
47	Wichtungsfaktor Q2	-
48	Wichtungsfaktor R	-
49	Wichtungsfaktor S	-
50	Fehlersignal	-
51	Wochentag (0:Do, 1:Fr, 2:Sa, 3:So, 4:Mo, 5:Di, 6: Mi)	-

Abbildung 8.2.3-6: Format der vom AMPC-SL-Modell erzeugten Logdatei

In Abbildung 8.2.3-7 sind beispielhaft auf Grundlage der vom Modell aufgezeichneten Logdatei die jeweiligen Referenzvorgaben und Grenzwerte für die Raumtemperatur im „Referenzraum“ für die unterschiedlichen Entwicklungsstände des AMPC-SL-Modells während des Testzeitraums dargestellt.

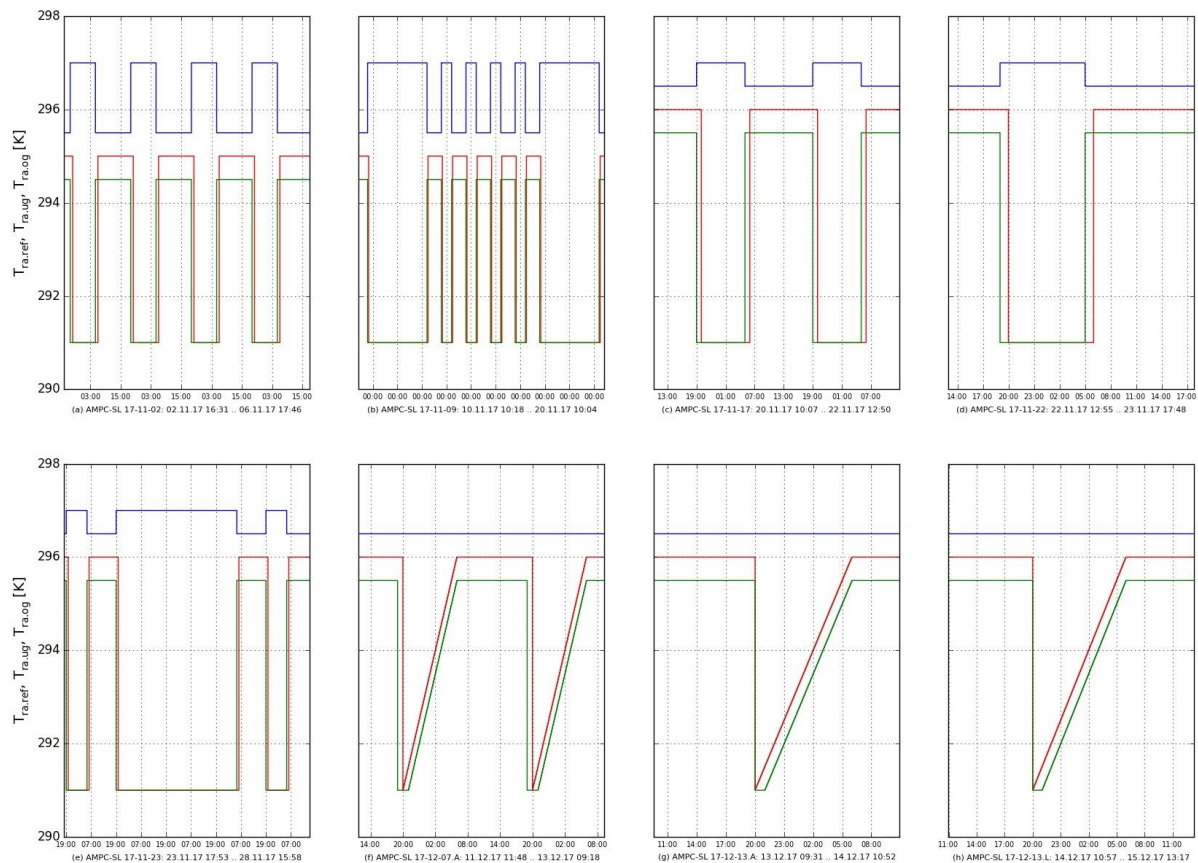


Abbildung 8.2.3-7: Vorgaben für Referenztrajektorie (rot) und Bereichsgrenzen (UG: grün, OG: blau) der Raumtemperatur je Test-Version/-Zeitraum gemäß Eintragungen in den AMPC-SL-Modell-Logdateien

8.2.3.1.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Ziel der Überprüfung war der prinzipielle Nachweis der Funktion und der Realisierbarkeit sowie ein erster Test der vom Projektpartner HAW Hamburg ausgearbeiteten AMPC-SL-Regelungsstrategie in der Echtzeitanwendung unter realen Einsatzbedingungen.

Im Vorfeld der Untersuchungen war bereits abzusehen, dass die dem AMPC-SL-Modell zugrundeliegende prädiktive Regelungsstrategie und die multilineare Modellierung ihr Einsatzpotenzial im genutzten Demonstrationsgebäude nicht voll entfalten können würde. Im Gebäude ist z.B. kein Pufferspeicher vorhanden, dessen thermische Masse durch eine vorausschauende Regelung energetisch vorteilhaft aktiviert werden könnte. Dennoch wurde eine exemplarische Implementierung und Evaluierung im Gebäudeautomationssystem des Demonstrationsgebäudes Kieback&Peter-Zentrale an einem Heizkreis vorgenommen.

Die Versuche wurden im Zeitraum Ende Oktober bis Mitte Dezember 2017 durchgeführt.

Während der gesamten AMPC-SL-Testphase wurde die Warmwasserbereitung im Demonstrationsgebäude auf den Betrieb mit einer elektrischen Heizpatrone umgestellt.

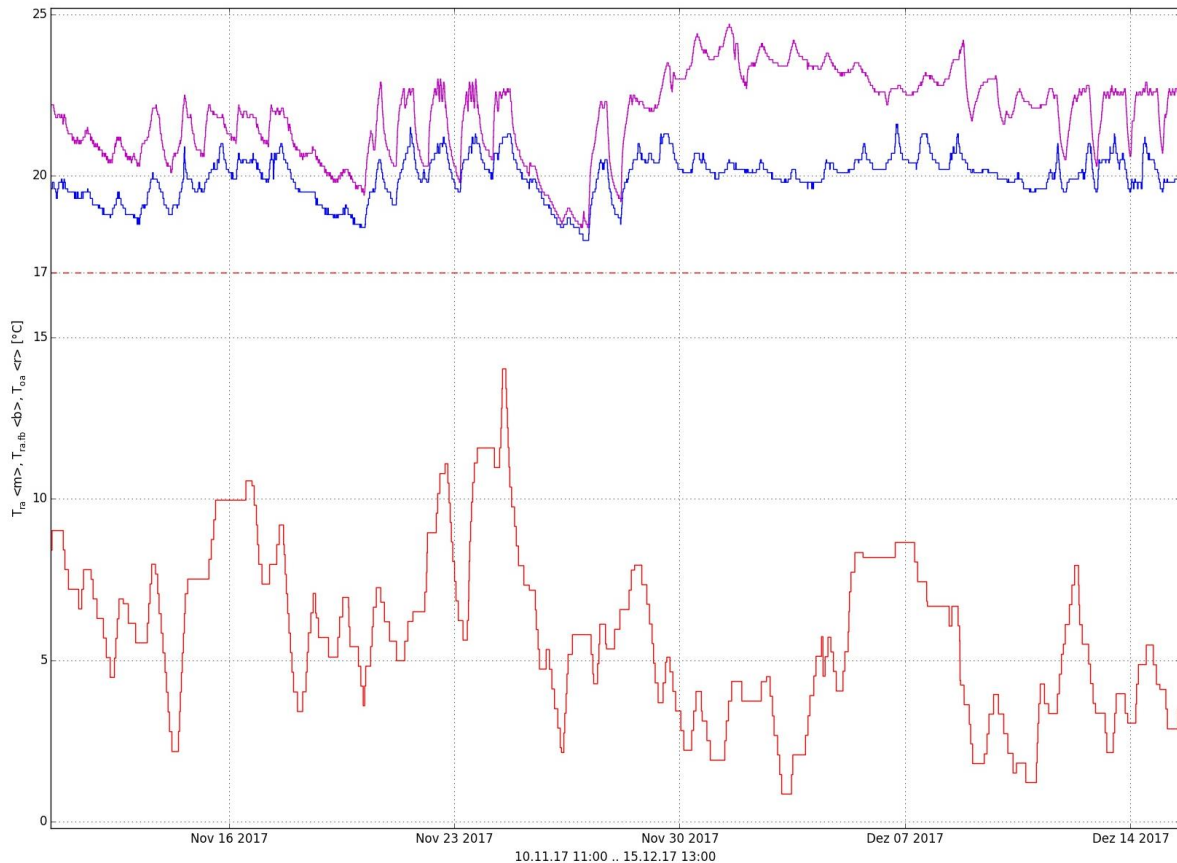


Abbildung 8.2.3-8: Raumtemperaturen („Referenz“: lila, „Fallback“: blau) und Außentemperatur (rot) während der AMPC-SL-Testphase

Wie man Abbildung 8.2.3-8 entnehmen kann, wurde die gewählte „Fallback“-Grenztemperatur von 17 °C während des dargestellten Zeitraumes (10.11.-15.12.17) nicht unterschritten, sodass während der Tests keine Zwangsumschaltung auf die konventionelle witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung ausgelöst werden musste.

Die am Standort des Demonstrationsgebäudes gemessenen Außentemperaturwerte während der AMPC-SL-Testphase sind ebenfalls in Abbildung 8.2.3-8 dargestellt. Der Mittelwert der Außentemperatur ($T_{\text{oa.mean}}$) liegt im Darstellungszeitraum bei ca. 6 °C ($T_{\text{oa.min}}=1$ °C, $T_{\text{oa.max}}=14$ °C). Es lagen somit ausreichend niedrige Temperaturen für die Testdurchführung vor.

Konzeptionell wurde die Regelungsaufgabe so gestaltet, dass der AMPC-SL die Vorlaufsolltemperatur des gewählten statischen Heizkreises auf Grundlage einer charakteristischen Raumtemperaturmessung, von Prognosewerten der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung, sowie weiteren Messgrößen aus dem Heizkreis (Rücklauftemperatur, Volumenstrom) optimal bestimmen können sollte. Dabei nutzt die AMPC-SL Regelung die in AP A.4 / Kapitel 6.4.3 „Anwendungsbeispiel“ definierte Kostenfunktion.

Der gewählte AMPC-SL-Ansatz ersetzte damit die zuvor bei dem statischen Heizkreis installierte witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung: Führung nach der Außentemperatur, Bestimmung der Sollvorlauftemperatur über eine Heizkurve. Das Ziel war es, auf Grundlage eines einfachen multilinearen Modells, mit der prognostizierten Störgrößenentwicklung sowie der Vorgabe einer Referenztrajektorie und eines Komfortbereiches für die gewünschte Raumtemperaturentwicklung, eine optimale Anpassung an die aktuellen Betriebsbedingungen hinsichtlich des benötigten Vorlauftemperaturniveaus zu erreichen. Die Ansteuerung des Regelventils erfolgte dabei wie zuvor entsprechend der Regelabweichung mit Hilfe eines PI-Reglers.

Abbildung 8.2.3-9 gibt einen Überblick über die AMPC-SL-Modell-Updates, die Kieback&Peter vom Projektpartner HAW Hamburg für die Einzeltests im ausgewählten Heizkreis bereitgestellt wurden. Das Bereitstellungsdatum kann dabei der jeweiligen Versionskennung entnommen werden. Weiterhin ist in der Übersicht eine Auswahl der wichtigsten Änderungsmaßnahmen enthalten.

Version	Änderungskommentar
17-12-13.L	Wie 17-12-13.A, aber mit einem fixen, linearen Modell
17-12-13.A	Um dem zuvor beobachteten, zu frühen Absenken der Raumtemperatur entgegenzuwirken: - Anpassung der Vorhersage der Referenz zum Tagesende ($\Rightarrow$ bis 19:59 Uhr $T_{ra.ref,Tag} \approx 23^\circ\text{C}$ (296 K); vgl. Beschreibung zum AP A.4, Kapitel 6.7.5). - Absenkung der unteren Begrenzung der Raumtemperatur erst zum Tag/Nacht-Wechsel, zeitgleich mit der Referenztrajektorie.
17-12-07.L	Wie 17-12-07.A, aber mit einem fixen, linearen Modell.
17-12-07.A	- Einführung einer rampenförmigen Referenztrajektorie und geänderter Bereichsgrenzen für die Raumtemperatur. Anstieg der Rampe beginnt um 20:00 Uhr bei $T_{ra.ref,Nacht} \approx 18^\circ\text{C}$ (291 K) und endet um 05:59 Uhr bei $T_{ra.ref,Tag} \approx 23^\circ\text{C}$ (296 K) - Anpassung von Modell-/Optimierungsparametern: q_1, q_2, r, s: $q_1, Tag = q_1, Nacht = 0$, $q_2, Tag = q_2, Nacht = 100$, $r, Tag = r, Nacht = 400$, $s, Tag = s, Nacht = 2$.
17-11-23	Anpassung von Modell-/Optimierungsparametern ($\Rightarrow$ um beobachteten Schwingungen im Vorlaufsolltemperatursignal entgegenzuwirken): r: - An den Wochentagen: 03:00..19:59 Uhr: $r, Tag = 600$
17-11-22	- Anpassung der Bereichsgrenzen für die errechnete Vorlaufsolltemperatur: $T_{sup.sp,max} = 80^\circ\text{C}$, $T_{sup.sp,min} = 30^\circ\text{C}$. - Verringerung der Untergrenze für die Rücklauftemperatur (um zu frühes Nachheizen zu verringern).
17-11-17	- Festsetzung der Untergrenze für den Vorlaufsolltemperaturwert $T_{sup.sp,min} = 40^\circ\text{C}$. - Erhöhung der „Referenzraumtemperatur“ am Tag auf $T_{ra.ref,Tag} \approx 23^\circ\text{C}$ (296 K) - Anpassung von Modell-/Optimierungsparametern und Umschaltzeitpunkten ($\Rightarrow$ verringerter Fokus auf der Referenzfolge): r: - An den Wochentagen: 03:00..19:59 Uhr: $r, Tag = 200$ 20:00..02:59 Uhr: $r, Nacht = 100$ - Keine Änderung der Umschaltzeitpunkte bei Solltrajektorie und Bereichsgrenzen für die Raumtemperatur.
17-11-09	Festsetzung der Untergrenze für den Vorlaufsolltemperaturwert $T_{sup.sp,min} = 20^\circ\text{C}$.
17-11-02	- Die Umrechnung des Volumenstroms $\dot{V}$ von $[\text{m}^3/\text{h}]$ in $[\text{m}^3/\text{s}]$ erfolgt im Modell. - Wird vom Modell ein Fehler in den Eingangssignalen erkannt, so wird ein vorgegebener Vorlaufsolltemperaturwert als Ersatzwert ausgegeben. - Festlegung der wichtigsten Modell-/Optimierungsparameter: q_1, q_2, r, s: - An den Wochentagen: 06:00..19:59 Uhr: $q_1, Tag = 0$, $q_2, Tag = 100$, $r, Tag = 50$, $s, Tag = 2$ 20:00..05:59 Uhr: $q_1, Nacht = 0$, $q_2, Nacht = 0$, $r, Nacht = 20$, $s, Nacht = 2$ - Am Wochenende: 00:00..23:59 Uhr: $q_1, Tag = q_1, Nacht = 0$, $q_2, Tag = q_2, Nacht = 0$, $r, Tag = r, Nacht = 20$, $s, Tag = s, Nacht = 2$ „Referenzraumtemperatur“: $T_{ra.ref,Tag} \approx 22^\circ\text{C}$ (295 K), $T_{ra.ref,Nacht} \approx 18^\circ\text{C}$ (291 K) - Die Grenzwerte für die Raumtemperatur im „Referenzraum“ werden zeitversetzt zu den obigen Zeiten jeweils um 1h voreilend festgesetzt: $T_{ra,ug,Tag} \approx 21.5^\circ\text{C}$ (294,5 K), $T_{ra,og,Tag} \approx 22.5^\circ\text{C}$ (295,5 K) und $T_{ra,ug,Nacht} \approx 18^\circ\text{C}$ (291 K), $T_{ra,og,Nacht} \approx 24^\circ\text{C}$ (297 K) - Prädiktionshorizont: 3 h, Stellhorizont: 2 h.

Abbildung 8.2.3-9: AMPC-SL-Modell-Updates und Änderungsmaßnahmen

Abbildung 8.2.3-10 zeigt die Zeiträume, in denen die AMPC-SL-Regelungsstrategie im ausgewählten Heizkreis des Demonstrationsgebäudes Kieback&Peter-Zentrale aktiv geschaltet war.

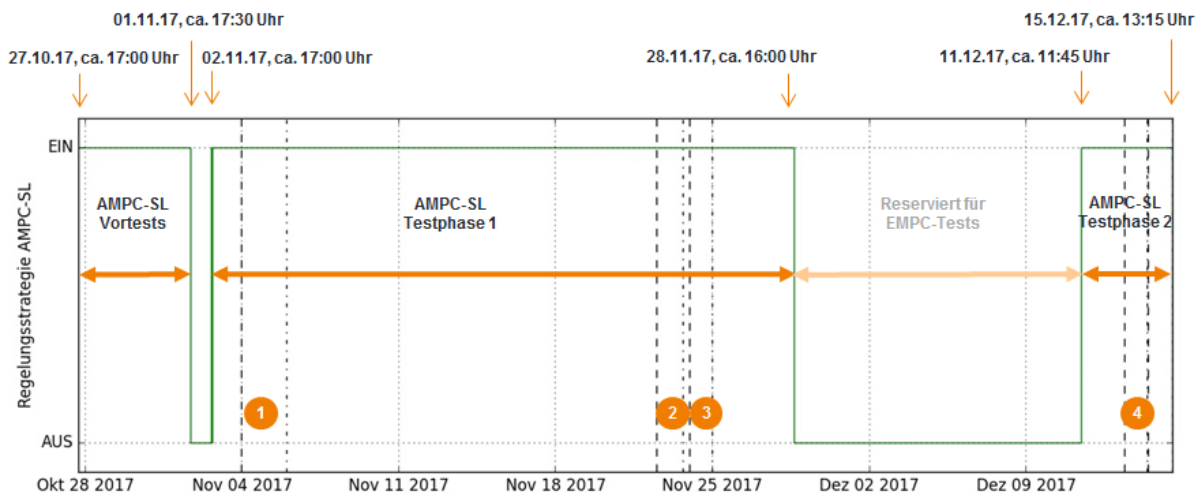


Abbildung 8.2.3-10: AMPC-SL-Testphasen im Demonstrationsgebäude

Während und nach jeder abgeschlossenen Testphase für einen bestimmten Versionsstand wurden dem Projektpartner HAW Hamburg die jeweils vom AMPC-SL-Modell erzeugten Protokolldateien zur weiteren Auswertung per E-Mail zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 8.2.3-11).

Datum	Version	Testzeitraum		Kommentar
Fr, 15.12.17	17-12-13.L	14.12.17	15.12.17	Finale Logdatei der AMPC-SL-Version 17-12-13.L
Do, 14.12.17	17-12-13.A	13.12.17	14.12.17	Finale Logdatei der AMPC-SL-Version 17-12-13.A
Do, 14.12.17	17-12-07.A	11.12.17	13.12.17	Finale Logdatei der AMPC-SL-Version 17-12-07.A
Di, 12.12.17	17-12-07.A	11.12.17	12.12.17	Ergebnisangaben der AMPC-SL-Version 17-12-07; Beginn Testreihen-Teil II
Di, 28.11.17	17-11-23	23.11.17	28.11.17	Finale Logdatei der AMPC-SL-Version 17-11-23; Ende Testreihen-Teil I (=>EMPC)
Fr, 24.11.17	17-11-23	23.11.17	24.11.17	Ergebnisangaben der AMPC-SL-Version 17-11-23
Fr, 24.11.17	17-11-22	22.11.17	23.11.17	Finale Logdatei der AMPC-SL-Version 17-11-22
Fr, 23.11.17	17-11-22	22.11.17	23.11.17	Ergebnisangaben der AMPC-SL-Version 17-11-22
Mi, 22.11.17	17-11-17	20.11.17	22.11.17	Finale Logdatei der AMPC-SL-Version 17-11-17
Di, 21.11.17	17-11-17	20.11.17	21.11.17	Ergebnisangaben der AMPC-SL-Version 17-11-17
Di, 21.11.17	17-11-09	10.11.17	20.11.17	Finale Logdatei der AMPC-SL-Version 17-11-09
Fr, 17.11.17	17-11-09	10.11.17	17.11.17	Ergebnisangaben der AMPC-SL-Version 17-11-09
Di, 14.11.17	17-11-09	10.11.17	14.11.17	Ergebnisangaben der AMPC-SL-Version 17-11-09
Mo, 13.11.17	17-11-09	10.11.17	13.11.17	Ergebnisangaben der AMPC-SL-Version 17-11-09
Mo, 13.11.17	17-11-09	10.11.17	13.11.17	Ergebnisangaben der AMPC-SL-Version 17-11-09
Mo, 06.11.17	17-11-02	02.11.17	06.11.17	Finale Logdatei der AMPC-SL-Version 17-11-02
Okt. 17	(..)	(..)	(..)	Voruntersuchungsphase

Abbildung 8.2.3-11: Bereitstellung von AMPC-SL-Testdaten

Abbildung 8.2.3-12 zeigt zur Veranschaulichung der Vorgänge während eines Testlaufes einen Ausschnitt aus einer zu Debugging-Zwecken auf dem Demonstratormodul Regelung mitgeschriebenen Kommunikation zwischen dem Gateway und dem AMPC-SL-Modell - zur Programmablaufsteuerung siehe Abbildung 8.2.3-5. Auf der linken Seite der Abbildung sind Debugging-Ausgaben vom Gateway dargestellt. Auf der rechten Seite sind die zugehörigen und in der Logdatei protokollierten Ausgaben vom AMPC-SL-Modell abgebildet. Die Spezifikationen der dabei zum Einsatz kommenden Kommunikationsschnittstellen sind in Kapitel 8.2.3.1.1 zu finden.

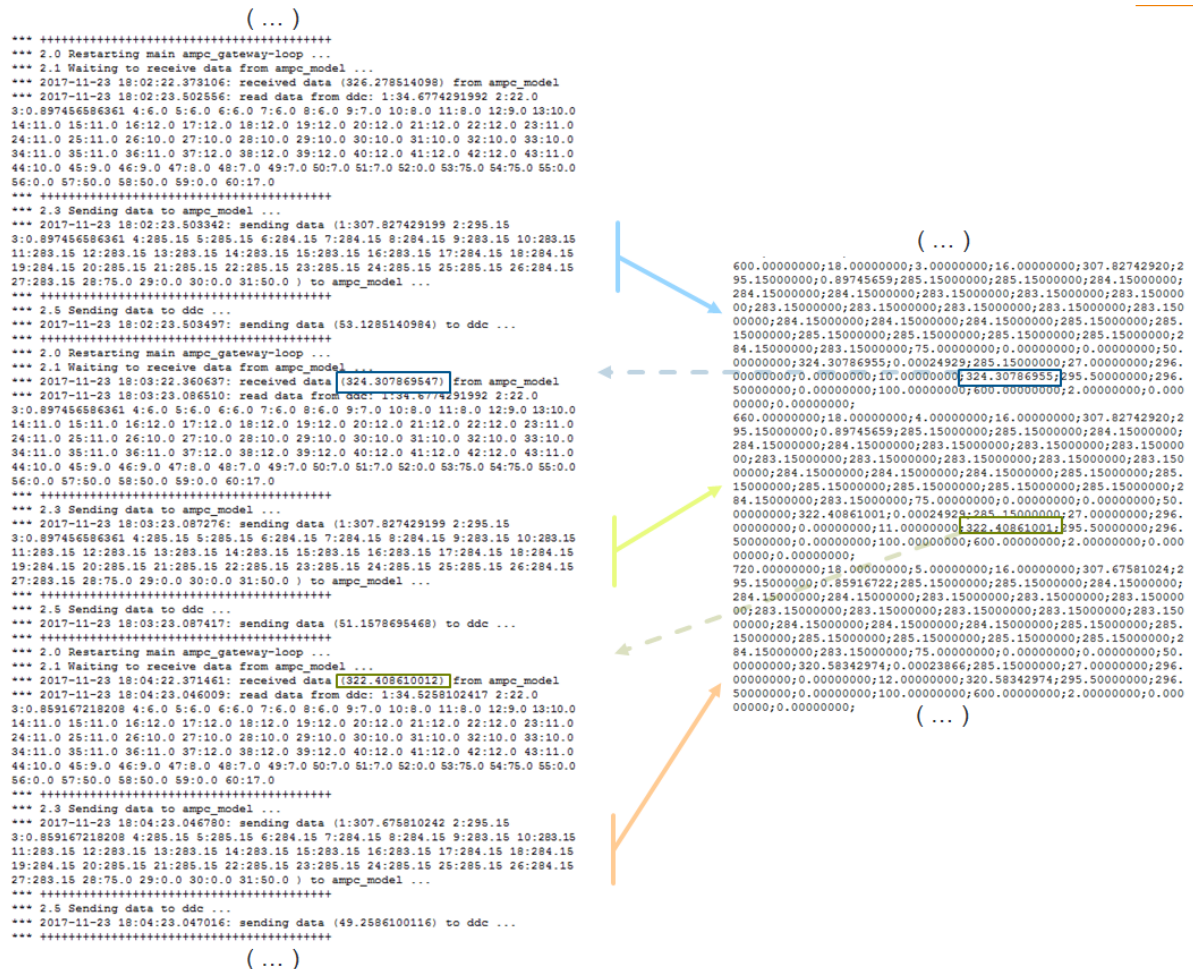


Abbildung 8.2.3-12: Beispiel - Kommunikation (Auszug) zwischen „Gateway“ und AMPC-SL-Modell

Die Versuchsdurchführungen wurden von Kieback&Peter vor Ort während der gesamten Testphase an einem GLT-Bedienplatz begleitet. Dabei wurden die auf dem Demonstratormodul aufgezeichneten Messdatenergebnisse auch anhand von GLT-Trendkurvendaten mit Hilfe von Analyse-Skripten plausibilisiert, und Auffälligkeiten dem Projektpartner gemeldet.

Darüber hinaus wurde vor Ort die Reaktion der Nutzer auf die geänderte Regelungsstrategie aufgenommen und dem Projektpartner mitgeteilt.

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 8.2.3-13 bis Abbildung 8.2.3-16) sind die vom AMPC-SL-Modell errechnete Vorlaufsolltemperatur und das resultierende Verhalten der Raumtemperatur im „Referenzraum“ für verschiedene AMPC-SL-Versionsstände und Testzeiträume dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung und Bewertung dieser Messdatenergebnisse ist in der Beschreibung zum Arbeitspaket A.4/Kapitel 6.7.5 „Implementierung am Gebäude“ zu finden.

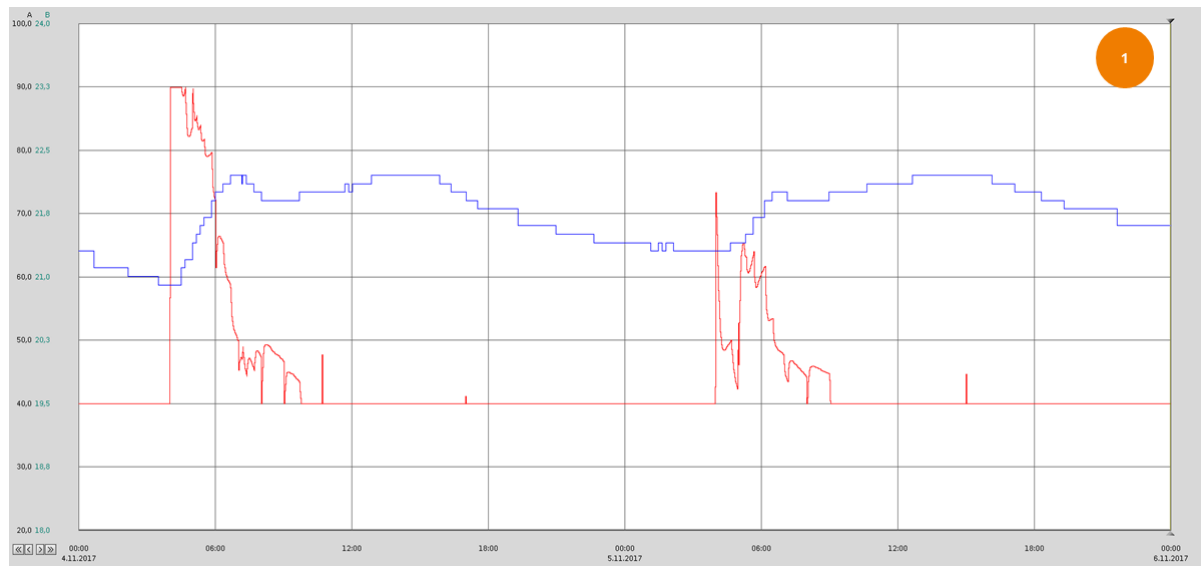


Abbildung 8.2.3-13: GLT-Aufzeichnung der vom AMPC-SL 17-11-02 errechneten Vorlaufsolltemperatur (rot) u. der resultierenden Raumtemperatur im „Referenzraum“ (blau), 04.11.17 00 Uhr bis 06.11.17 00 Uhr

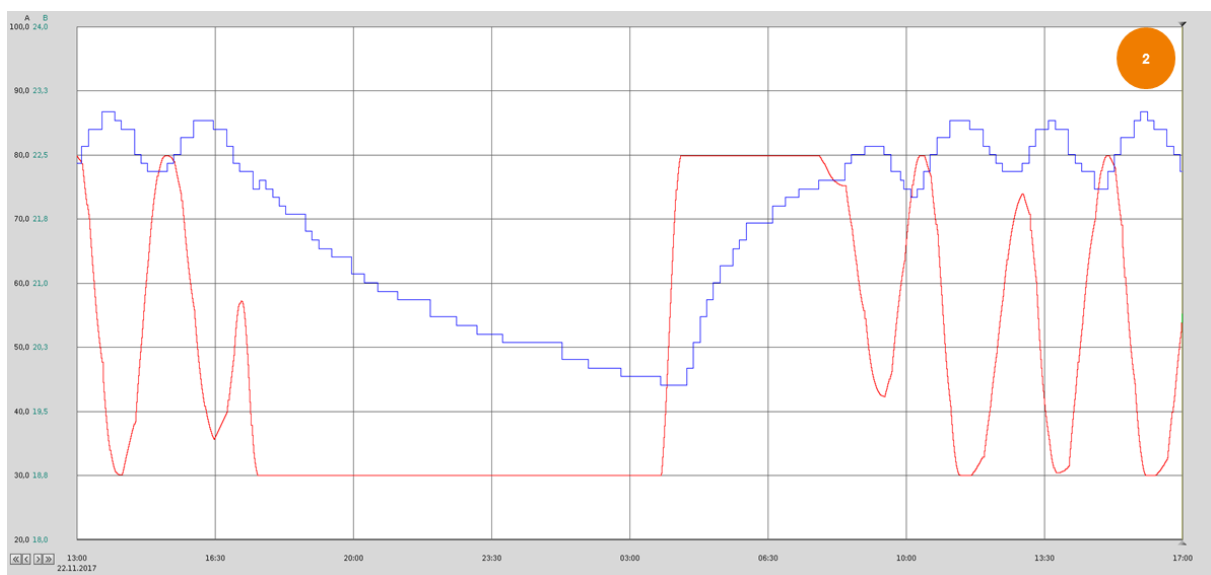


Abbildung 8.2.3-14: GLT-Aufzeichnung der vom AMPC-SL 17-11-22 errechneten Vorlaufsolltemperatur (rot) u. der resultierenden Raumtemperatur im „Referenzraum“ (blau), 22.11.17 13 Uhr bis 23.11.17 17 Uhr

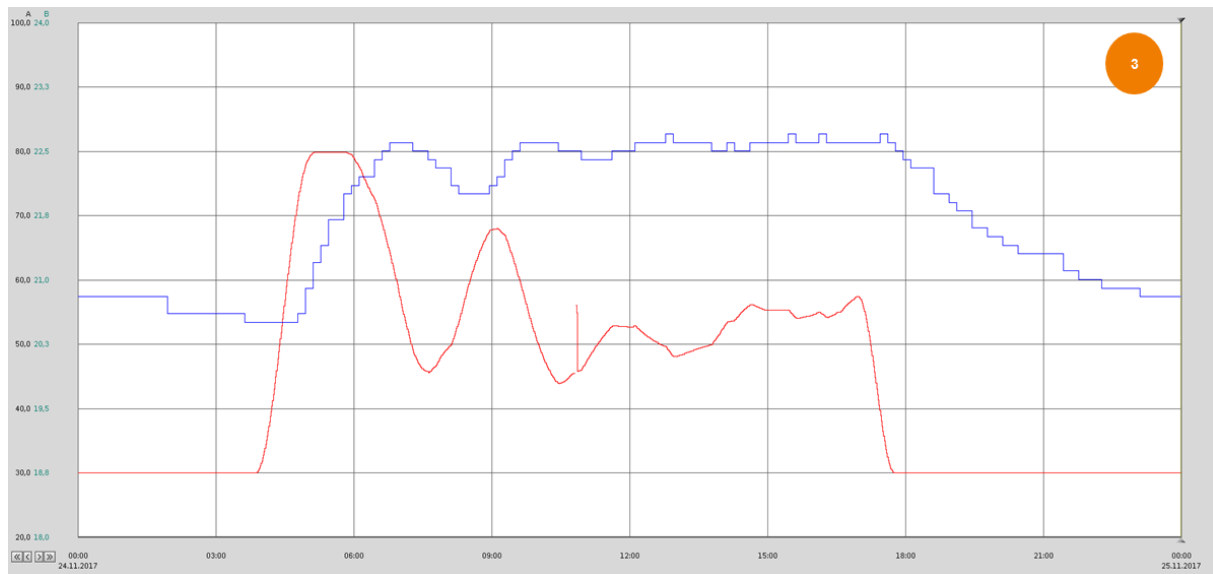


Abbildung 8.2.3-15: GLT-Aufzeichnung der vom AMPC-SL 17-11-23 errechneten Vorlaufsolltemperatur (rot) u. der resultierenden Raumtemperatur im „Referenzraum“ (blau), 24.11.17 17 Uhr bis 25.11.17 17 Uhr

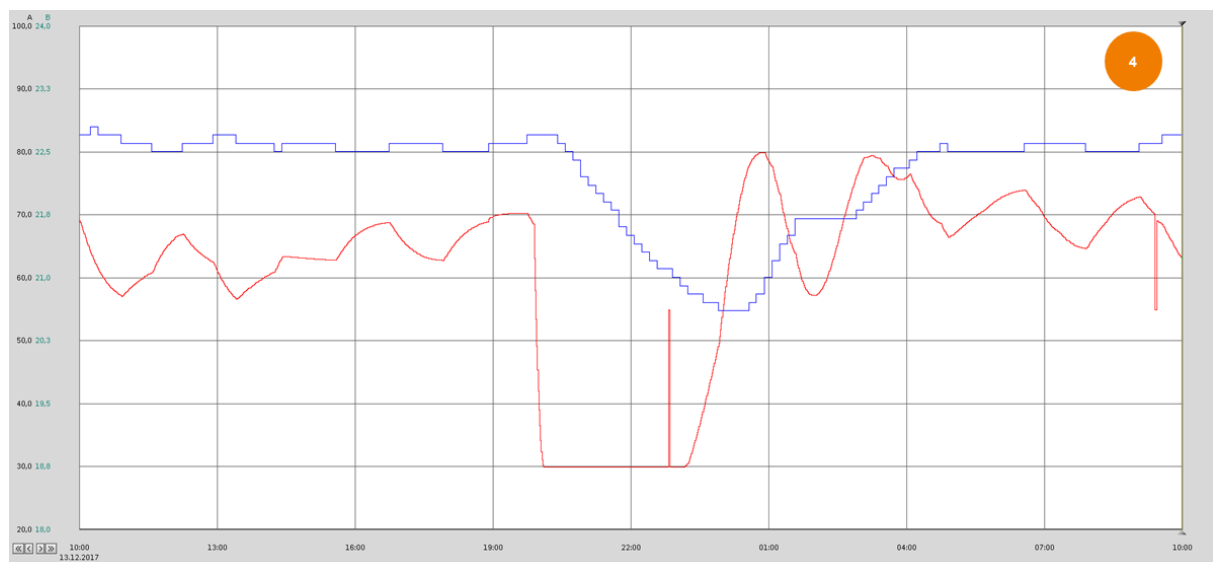
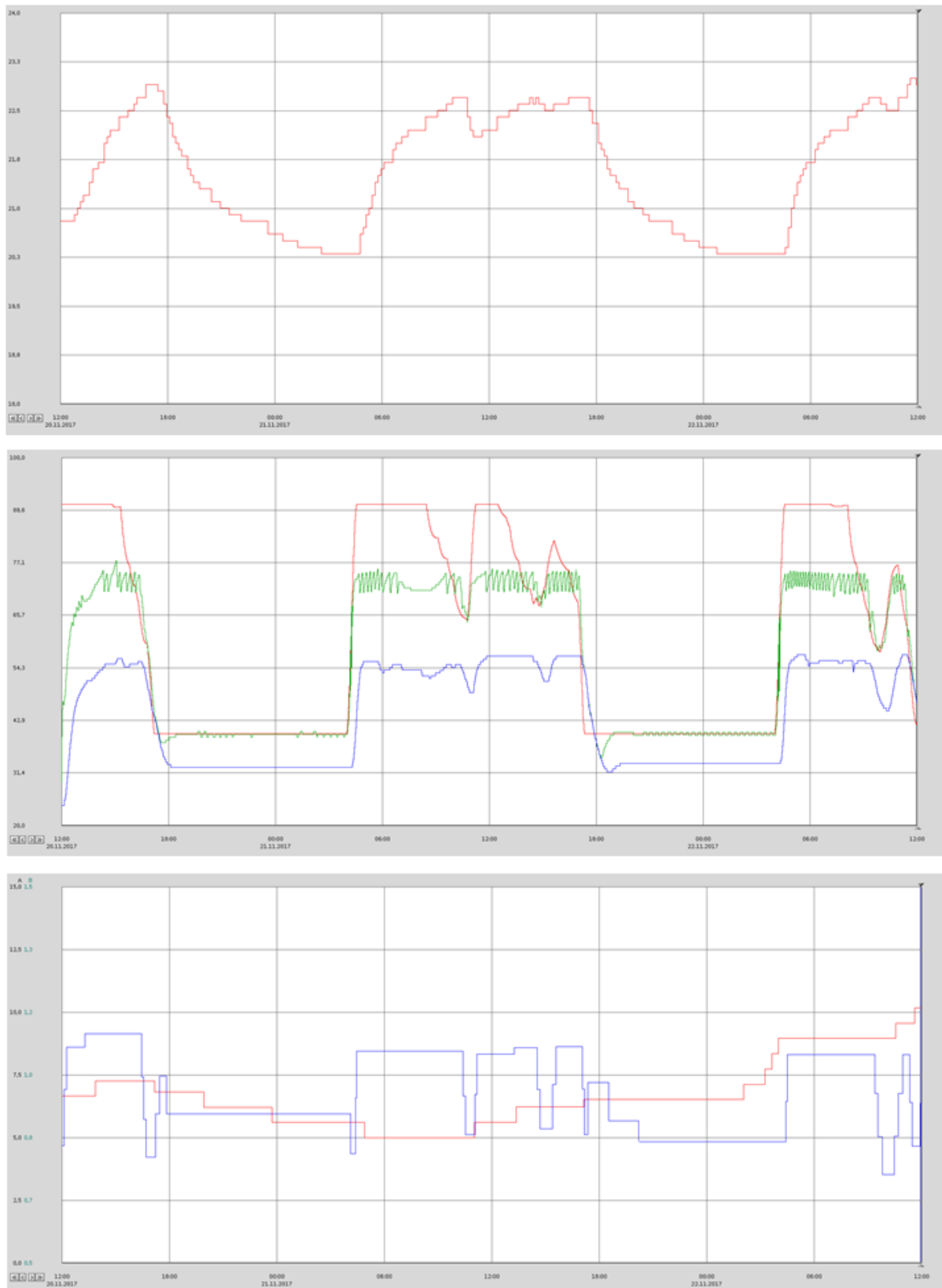


Abbildung 8.2.3-16: GLT-Aufzeichnung der vom AMPC-SL 17-12-13.A errechneten Vorlaufsolltemperatur (rot) u. der resultierenden Raumtemperatur im „Referenzraum“ (blau), 13.12.17 10 Uhr bis 14.12.17 10 Uhr

Ergänzend und zur Unterstützung der Ausführungen in der Beschreibung zum Arbeitspaket A.4/Kapitel 6.7.5 „Implementierung am Gebäude“ sind nachfolgend in Abbildung 8.2.3-17 noch GLT-Aufzeichnungen zur Version AMPC-SL 17-11-17 dargestellt.

Wie schon in Kapitel 6.7.5 „Implementierung am Gebäude“ angemerkt, so kann man auch hier im mittleren Diagramm in Abbildung 8.2.3-17 feststellen, dass die Vorlauf-temperatur (grüne Kurve) auf Grund des im Betrachtungszeitraum in der Anlage eingestellten Begrenzungswertes des Kesselthermostaten meist nicht die vom AMPC-SL geforderte Vorlaufsolltemperatur (rote Kurve) erreicht. Dies gilt es bei der Bewertung der Ergebnisse und der Anwendung des Verfahrens zu berücksichtigen.



**Abbildung 8.2.3-17: GLT-Aufzeichnung von Messdatenergebnissen der AMPC-SL-Version 17-11-17
(Oben: T_{ra} / Mitte: $T_{sup.sp}$ (rot), T_{sup} (grün), T_{ret} (blau), Unten: T_{oa} (rot), $\dot{V}$ (blau))**

Leider konnten im Projekt keine detaillierten Untersuchungen des Unterschiedes zwischen den AMPC-Modell-Versionen mit und ohne sukzessive Linearisierung mehr vorgenommen werden, da gegen Projektende u. a. im Dezember noch Testzeiten im Demonstrationsgebäude für die Durchführung von EMPC-Tests vorgehalten werden mussten (siehe Kapitel 8.2.3.3.3).

Ein erster Test mit der vom Projektpartner bereitgestellten AMPC-SL-Version 17-12-13.L (fixes, lineares Modell) ergab keine wesentlichen Unterschiede zur Version mit sukzessiver Linearisierung (17-12-13.A), was ein Hinweis dafür sein kann, dass die vorliegenden Versuchsbedingungen für einen solchen Test nicht komplex genug waren (siehe Abbildung 8.2.3-18). Z. B. zeigte der Volumenstrom während der Tests nur eine geringe Dynamik (siehe z. B. Abbildung 8.2.3-17, unten – blaue Kurve, max. Schwankungsbreite ca. 0.3), was die Anwendung eines einfachen, linearen Modells begünstigen würde. Die Vorteile der sukzessiven Linearisierung konnten anhand der Beispielanwendung daher nicht weiter herausgearbeitet werden.

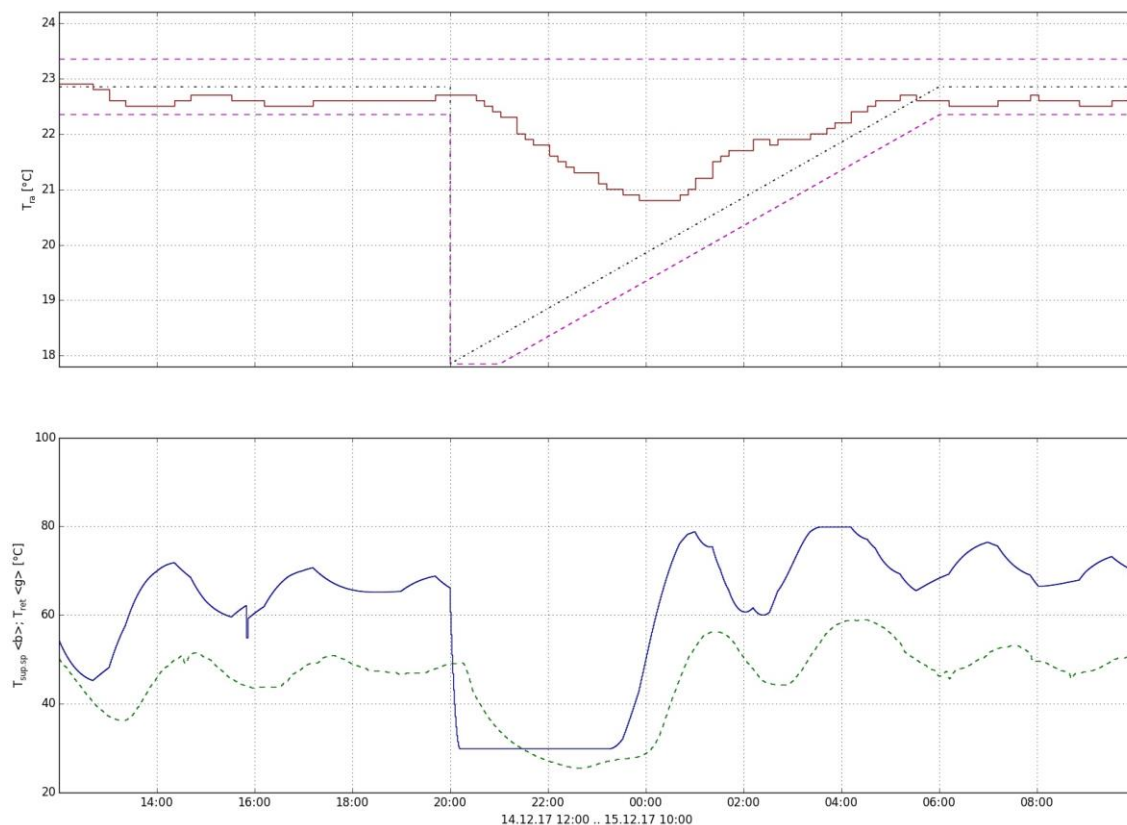


Abbildung 8.2.3-18: Messdatenergebnisse zur AMPC-SL-Version 17-12-13.L

8.2.3.2 MPC und datenbasierter ILC

Bei der im Folgenden behandelten Kombination aus einer modellprädiktiven Regelung (Model Predictive Control - MPC) und einer iterativ lernenden Regelung (Iterative Learning Control - ILC) handelt es sich um eine Variante, die auf Basis eines erstellten Systemmodells sowohl das zukünftige Prozessverhalten als auch mögliche Modellierungsfehler auf Grund eines einfachen Modells sukzessive berücksichtigt.

In Heizungssystemen wird eine solche periodische Störung z.B. durch die tägliche Variation der Außentemperatur verursacht, die jedoch nicht immer nur einer strengen Periodizität folgt. Aus diesem Grund wurde der iterativ lernende Ansatz zusätzlich mit einer datenbasierten Komponente kombiniert, die auf Grund von historischen Daten ähnliche Temperaturverläufe bewertet und somit korrigierend zur Lösungsfindung herangezogen werden kann. Im Folgenden wird dieser regelungstechnische Ansatz als „MPC+ILC“ bezeichnet

Die Methoden der modellprädiktiven und iterativ lernenden Regelung werden eingehend im Kapitel 4 „AP B.4 Lernende prädiktive Regelung, Methoden und Design“ behandelt.

Zur Realisierung der modellprädiktiven Regelungsmethoden unterschiedlicher Ausprägungen, die von dem Projektpartner HAW Hamburg entwickelt und in den Demonstrator-Umgebungen von Kieback&Peter (siehe „Kapitel 8.2.3.2.2 Teststand autarker Heizkreis“ sowie „Kapitel 8.2.3.3.2. Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale“) beispielhaft umgesetzt und erprobt wurden, mussten zunächst konzeptionelle Vorarbeiten innerhalb dieser gebäudetechnischen Anlagen durchgeführt werden.

Sowohl für die im Kapitel 8.2.3.2.3 beschriebene datenbasierte lernende modellprädiktive Regelung (MPC+ILC) innerhalb des Teststandes mit kontinuierlichen Signalen (siehe AP B.4, Kapitel 7.4.1 „Iterativ lernende Regelung“) als auch für die Untersuchungen gemäß „Kapitel 8.2.3.3 EMPC“, waren folgende Integrationsarbeiten notwendig:

- Bereitstellung von Anlagendaten zur Modellvalidierung
- IT-technische Anbindung der MPC/ILC-Lösung an den Teststand von K&P
- Integration von Wettervorhersagedaten in die Systemumgebung
- Abgleich, Bereitstellung und BACnet Anbindung von Anlagendatenpunkten
- Kommunikationsprüfung (1:1-Tests und Erst-Inbetriebnahme)
- Iterative Abstimmungsarbeiten mit dem Projektpartner
- Bereitstellung von Messdaten unterschiedlicher Testfälle

Die erforderlichen Umsetzungen werden in den folgenden Kapiteln näher behandelt. Dabei wird zum einen auf eine generelle Bereitstellung von Wetterprognosen im Kapitel 8.2.3.2.1 eingegangen, und zum anderen der als erste Testumgebung für modellprädiktive Regelungsansätze verwendete „Teststand autarker Heizkreis“ im Kapitel 8.2.3.2.2 ausführlich beschrieben.

8.2.3.2.1 Bereitstellung von Wetterprognosen

Im Zuge der Implementierungsarbeiten zu den modellprädiktiven Regelungsansätzen sowohl auf dem Teststand (siehe Kapitel 8.2.3.2.2) als auch innerhalb des Demonstrationsgebäudes Kieback&Peter-Zentrale (siehe Kapitel 8.2.3.3.2), war es notwendig, prognostische Wetterinformationen mit einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung bereitzustellen, und diese für die prädiktiven Regelungsansätze innerhalb der Demonstrationsumgebungen von Kieback&Peter zugänglich zu machen.

Neben der Verfügbarkeit von Wetterprognosedaten aus dem Internet wurde hierzu eine autarke Lösung umgesetzt, die auch im operationellen Projektgeschäft von Kieback&Peter zum Einsatz kommt. Da Kundenanlagen aus sicherheitsrelevanten Gründen in einem meist eigenständigen IT-Netzwerk betrieben werden, verfügen diese oftmals nicht über eine direkte Internetanbindung.

Realisiert wurde die Lösung mit einer Wetterprognose-Station Compact der Firma HKW-Elektronik (<http://wetterprognosestation.hkw-elektronik.de/>), die die benötigten prognostischen Informationen über einen IT-unabhängigen Kommunikationskanal via Langwellenfunk empfängt und zur Verfügung stellt. Im Folgenden wird dieses System als „Wetterstation“ bezeichnet und deren Arbeitsweise näher beschrieben.

Zum Datenempfang wird in der Wetterstation ein frequenzmoduliertes Verfahren (Frequency Shift Keying - FSK) verwendet, das unempfindlich gegenüber (atmosphärischen) Störungen ist und auf Grund der Verteilung über drei Langwellensender (DCF49, DCF39 und HGA22) einen robusten EU-weiten Empfang von Wettervorhersageinformationen realisiert.

Die Wetterstation verfügt über eine RS485-Schnittstelle (Modbus RTU - Remote Terminal Unit) und ermöglicht damit eine kommunikative Anbindung an weitere technische Systeme, die dieses serielle Kommunikationsprotokoll unterstützen. Ein in dieser Station integrierter Temperaturfühler lässt sich zusätzlich als Außentemperaturfühler verwenden, da das Gerät für die Montage im Freien konzipiert ist. Durch den Empfang des ebenfalls über Langwelle ausgestrahlten DCF77 Signals der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt verfügt die Station über eine hochgenaue Funkuhr (UTC).

Mit der Wetterstation erhält man neben dem eigentlichen Gerät (Hardware) einen uneingeschränkten Zugriff auf die von professionellen Wetterdiensten bereitgestellten Prognosedaten für mehr als 8000 Städte innerhalb Europas, die viermal am Tag aktualisiert werden. Die Preise für die Station richten sich dabei nach den unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Wetterprognosepaketen, welche sich durch die Anzahl der bereitgestellten meteorologischen Parameter sowie deren zeitliche Auflösung unterscheiden.

Kieback&Peter verwendete im Projekt das Prognosepaket „Premium All inclusive advanced“, bei der die Außentemperaturprognosen in einer stündlichen Auflösung für den aktuellen und drei Folgetage verfügbar sind. Des Weiteren wurden Solarprognosen in Form von Sonnenscheindauer und solarer Einstrahlung, Windprognosen für den aktuellen und einen Folgetag sowie Meldungen zu „markantem Wetter“ in einem sechs Stundenraster übertragen.

Zur Anbindung der Wetterstation an eine Automationsstation und weitere Systeme, sowie zur Kommunikation mit einer verwendeten Gebäudeleittechnik (GLT), wurde ein „Modbus nach BACnet“ Gateway eingesetzt.

Für diese Aufgaben wurde der FieldServer (Typ FS-EZ1-MOD-BAC) der Firma Sierramonitor (<https://www.sierramonitor.com/>) verwendet. Dieses Gateway übernimmt die Wandlung der seriell übermittelten, binären Datenpunkte (vorliegend als

Register innerhalb des Modbus-Protokolls) und ermöglicht eine Transformation der benötigten Informationen als eindeutige BACnet-Datenpunkte.

Hierfür ist eine speziell zu erstellende Projektierung in Form einer CSV-Datei notwendig. Die Übertragung über das File Transfer Protokoll (FTP) als auch die Grundkonfiguration des Gateways erfolgt über ein integriertes Web-Interface. Hiermit ist auch die Konfiguration der Wetterstation durchführbar, bei der z.B. die Auswahl des Langwellensenders oder die Festlegung eines Referenzortes für das zu prognostizierende Gebiet ermöglicht wird.

Innerhalb eines IP-basierten Netzwerks verhält sich der FieldServer als eigenständiges BACnet-Device und erlaubt damit anderen BACnet-Clients den Zugriff auf die dort vorhandenen BACnet-Datenpunkte. Somit konnten die Prognosewerte der Wetterstation zur weiteren Verarbeitung innerhalb der modellprädiktiven Regelungsansätze zur Verfügung gestellt werden. Die Abbildung 8.2.3-19 veranschaulicht die technische Umsetzung, beginnend mit dem Empfang der Wettervorhersagedaten über Langwelle, deren Umsetzung nach BACnet/IP sowie die Bereitstellung der Information an die integrierten Systeme DDC, GLT und die verwendeten Hardwareplattform (z.B. Echtzeitsystem cRIO-9035), auf der die modellbasierten Regelungsansätze der HAW umgesetzt wurden (siehe AP B.4 - Kapitel 7.7 „Verwendete Hardware für die Implementierung“).

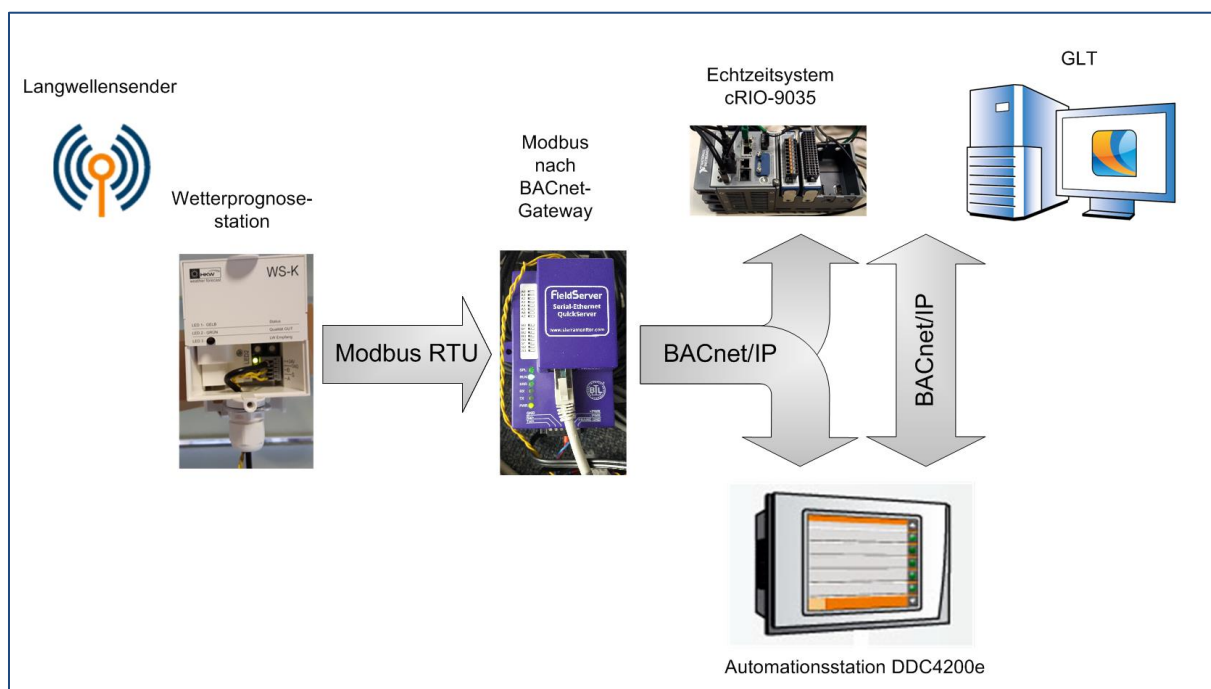


Abbildung 8.2.3-19: Integration von Wetterprognosen

8.2.3.2.2 Beschreibung des Teststandes

Für die Projektaufgaben im vorliegenden AP A.5 „Implementierung und Evaluation in Gebäudeautomationssystemen“ wurde zur Realisierung und Erprobung von prädiktiven Regelungsmethoden ein von Kieback&Peter bereitgestellter Testaufbau verwendet, der im Folgenden als „Teststand“ bezeichnet wird.

Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, neue regelungstechnische Konzepte zunächst unter Laborbedingungen zu testen und zu erproben. In einer späteren Evaluierungsphase wurden dann die gewonnenen Erkenntnisse in der realen Anlage innerhalb des Demonstrationsgebäudes von Kieback&Peter angewendet (siehe Kapitel 8.2.3.3 EMPC).

Mit der Realisierung dieser Testumgebung konnten folgende Aufgaben bewältigt werden:

- Schaffung einer Laborumgebung „Bürraum“ mit einer autarken Energieversorgungseinrichtung
- Input für die Modellbildung und Kalibrierung auf Raum- und Gebäudeebene
- Integration von modellbasierten Regelungsansätzen und deren Übertragung auf den Teststand (Software In the Loop - SIL)
- Übertragung relevanter Datenpunkte via BACnet an eine Automationsstation
- Integration von lokalen Wettervorhersagen für modellbasierte Regelungsstrategien
- Erweiterung und Übertragung der Ergebnisse im Hinblick auf eine reale Etage/Heizkreis bzw. Gebäude

Im Folgenden wird die prinzipielle Funktionsweise der Testumgebung beschrieben.

Bei dem Teststand handelt es sich um eine Einzelraumheizung, die über einen 230V Netzanschluss mit Energie versorgt wird.

Der Teststand beinhaltet folgende Komponenten:

- Wärmeerzeuger (5 Liter Warmwasserspeicher/Boiler, Anschlussleistung 2KW)
- stetiger Stellantrieb (0-10V) in Kombination mit einem 4-Wege-Ventil
- Umwälzpumpe mit einstellbarer Förderleistung
- Sensorik (Raumtemperatur, Vor- und Rücklauftemperaturen primär und sekundär)
- Volumenstrommessung (Sekundärkreis)
- Verbraucher (Heizkörper)
- Automationsstation DDC4200e (Kieback&Peter)

Ein elektrisch betriebener Warmwasserboiler versorgt den mobilen Aufbau mit Wärme. Eine Umwälzpumpe übernimmt den Transport der Wärmeenergie innerhalb des Heizungskreislaufs. Mit Hilfe einer integrierten Phasenanschnittsteuerung, kann das Heizsystem eine Vorlauftemperatur von 20°C bis ca. 85°C bereitstellen.

Die Hydraulik der Anlage ist gemäß einer Beimischschaltung konzipiert, bei der über ein Vier-Wege-Ventil der wärmere Vorlauf mit dem kälteren Rücklauf beigemischt wird. Mit Hilfe eines im Sekundärkreis befindlichen Wärmemengenzählers kann zusätzliche eine kontinuierliche Volumenstrommessung zur Verfügung gestellt werden. Die Abbildung 8.2.3-20 verdeutlicht den prinzipiellen Testaufbau.

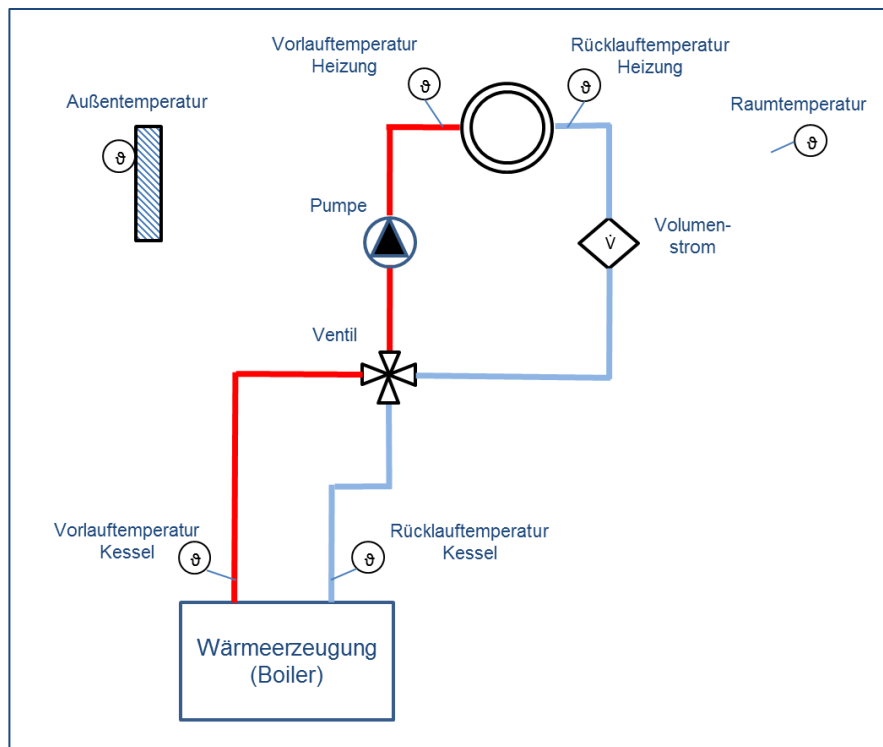


Abbildung 8.2.3-20: Anlagenschema - Teststand autarker Heizkreis

In der Regel werden innerhalb des Teststands die regelungstechnischen Aufgaben von einer Automationsstation von Kieback&Peter (DDC4200e) übernommen, wobei in Abhängigkeit einer gemessenen Außentemperatur ein über eine Heizkennlinie ermittelter Vorlaufsollwert bestimmt und auf diesen geregelt wird (witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung). Zusätzlich kann unter Zuhilfenahme der gemessenen Raumtemperatur eine Anpassung an den tatsächlichen Wärmebedarf des Raumes vorgenommen werden („Raumkorrektur“).

Mit Hilfe der DDC4200e und einer hierfür von Kieback&Peter erstellten Anlagenprojektion konnten alle relevanten Datenpunkte kommunikativ über das BACnet-Protokoll abgebildet werden. Damit wurden die verwendeten Datenpunkte

- Vor- und Rücklauftemperatur primärseitig am Wärmeerzeuger
- Vor- und Rücklauftemperatur sekundärseitig im Heizkreis
- Ansteuersignal für den Wärmeerzeuger
- Ansteuersignal für die Umwälzpumpe
- Ansteuersignal 4-Wege-Ventil

auf einem ebenfalls BACnet-fähigem Gerät erreichbar. Neben dem lesenden Zugriff auf die Temperaturwerte sind über BACnet auch schreibende Zugriffe auf den Wärmeerzeuger, die Pumpen- und Ventilansteuerung als überprägende Sollwertvorgaben ermöglicht worden.

Die Abbildung 8.2.3-21 zeigt ein Foto des realen Teststands.



Abbildung 8.2.3-21: Teststand autarker Heizkreis (Kieback&Peter)

Mit Hilfe dieser Versuchsumgebung konnten die technischen Voraussetzungen geschaffen werden, um modellprädiktive Regelungsansätze zunächst in einem kontrollierbaren Umfeld zu erproben und tragfähige Konzepte für eine Kommunikationsanbindung zwischen einer Automationsstation von Kieback&Peter und einer weiteren Hardwareplattform (siehe AP B.4 – Kapitel 7.7 „Verwendete Hardware für die Implementierung“) auf BACnet-Ebene zu realisieren.

Die beispielhaften Implementierungen des Projektpartners HAW Hamburg konnten damit sowohl für eine datenbasierte lernende modellprädiktive Regelung im nachfolgenden Kapitel 8.2.3.2.3, sowie eine modellprädiktive Regelung mit einer linearen Kostenfunktion gemäß Kapitel 8.2.3.3 ermöglicht werden. Die Integration der hierzu benötigten Wetterprognosedaten sind im Kapitel 8.2.3.2.1 zusammengefasst.

8.2.3.2.3 Realisierung am Teststand

Der Projektpartner HAW Hamburg hat die Modelle der im Heizsystem „Teststand“ verwendeten Komponenten Wärmeerzeuger, Pumpe und Verbraucher aus Wärmebilanzgleichungen erstellt. Das in der Anlage verwendete 4-Wege-Ventil wurde über ein lineares Black-Box-Modell abgebildet.

Mit Hilfe von Messdaten aus dem konventionellen Anlagenbetrieb (gemäß einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung) wurden die Modellparameter identifiziert und durch einen Abgleich zwischen dem dynamischen Verhalten des Modells und den entsprechenden Messdaten validiert.

Das komponentenbasierte Gesamtmodell des Heizungssystems wurde vom Projektpartner mit Matlab/Simulink umgesetzt und mit Hilfe von Simulationen verifiziert. Der

eigentliche Regelalgorithmus wurde dann unter anderem unter Zuhilfenahme der MPC Toolbox von MathWorks auf einer Hardwareplattform mit Hilfe von LabVIEW implementiert.

In einer frühen Projektphase wurden in Vorbereitung zur Realisierung von modellprädiktiven Verfahren ein vom Projektpartner HAW Hamburg bereitgestelltes Echtzeitsystem vom Typ „Speedgoat“ innerhalb des Teststands zum Einsatz gebracht (siehe Abbildung 8.2.3-22). Über die hierbei zur Verfügung stehende Schnittstelle konnten die Messwerte und Steuersignale direkt über ein analoges 0-10 Volt Signal zwischen dem Echtzeitsystem und der DDC ausgetauscht werden. Der in LabVIEW implementierte prädiktive Regler ermöglichte eine direkte Ansteuerung der Stellsignale. Innerhalb dieser Realisierung mussten die für den MPC benötigten Temperaturprognosen jedoch täglich aktualisiert und manuell über einen USB-Stick zugespielt werden, da auf Grund der analogen Übertragung keine direkte Kommunikation mit der Wetterstation möglich war.

Mit diesem System konnten daher zunächst Vorabtests zur Umsetzung von modellbasierten Methoden durchgeführt und eine direkte I/O-Anbindung an eine DDC geschaffen werden. Auf Grund der fehlenden BACnet-Integration konnte diese „Insellösung“ nur temporär zum Einsatz gebracht werden.



Abbildung 8.2.3-22: Echtzeitsystem "Speedgoat" (l), direkte Anbindung der Datenpunkte an die DDC (r)

Im Hinblick auf eine strukturelle Übertragbarkeit der MPC-Ansätze auf weitere Testsysteme wurde im Laufe der späteren Projektphase diese Lösung durch ein leistungsfähigeres Echtzeitsystem der Firma National Instruments (CompactRIO-9030 - im Folgenden als cRIO bezeichnet) ersetzt. Dieses System wird im AP B.4 – Kapitel 7.7 „Verwendete Hardware für die Implementierung“ detailliert beschrieben. Hiermit konnten im Projektverlauf die Umsetzungskonzepte für den MPC+ILC (später auch bedingt für den EMPC) zu einer geschlossenen Lösung gebracht werden, und auf diese Weise erstmalig eine Kommunikation über BACnet erfolgen. Die Abbildung 8.2.3-23 zeigt das Echtzeitsystem cRIO im Einsatz innerhalb der Inbetriebnahme am Teststand.

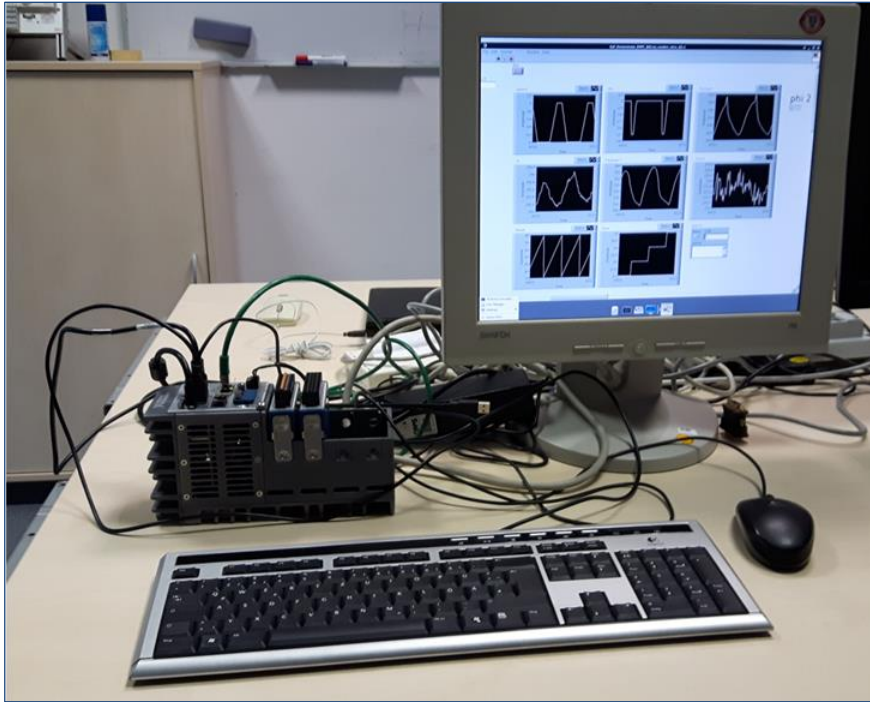


Abbildung 8.2.3-23: cRIO-System im Einsatz am Teststand

Zur Integration der Hardwarekomponenten, auf denen die modellprädiktiven Regelungsstrategien (MPC+ILC sowie EMPC gem. Kapitel 8.2.3.3) in einer „Hardware-In-the-Loop“ Anbindung (HiL) prozessiert wurden, musste zunächst eine Integration der beteiligten Systeme Automationsstation, Echtzeitsystem cRIO und Wetterstation in die hausinterne Netzwerkstruktur von Kieback&Peter erfolgen. Hierbei mussten IT-technische Voraussetzungen geschaffen werden um diese Komponenten gemeinsam in dem technischen Hausnetz von Kieback&Peter zu betreiben.

Die kommunikative Anbindung der verwendeten Systeme wurde über BACnet-IP realisiert. Dabei wurden die benötigten Sensor- und Aktorinformationen aus der Automationsstation als auch die Daten der Wetterstation (siehe Kapitel 8.2.3.2.1) BACnet-seitig umgesetzt und dem Echtzeitsystem zur Verfügung gestellt. Die dort berechneten Stellsignale wurden ebenfalls über BACnet-IP an die Automationsstation übertragen und ermöglichten damit die notwendige Ansteuerung der Aktoren. Innerhalb der LabVIEW-Programmierungsumgebung wurde hierzu das BACnet-IP Protokoll der Firma OVAK Technologies verwendet.

Damit konnte ein stabiler und konsistenter Datenaustausch zwischen den Systemen innerhalb einer gemeinsamen Netzwerkumgebung etabliert werden.

8.2.3.2.4 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Die Versuchsdurchführungen zu den MPC+ILC-basierten Regelungsansätzen erfolgten innerhalb der bereits im Kapitel 8.2.3.2.2 dokumentierten Umgebung des Teststandes in einem Büroraum des Demonstrationsgebäudes „Kieback&Peter-Zentrale“. Die hierfür vom Projektpartner HAW Hamburg umgesetzte Reglerimplementierung wurde auf der beschriebenen Hardwareplattform cRIO realisiert und Kieback&Peter zur Verfügung gestellt.

Während der Inbetriebnahme konnten die im Vorfeld definierten Schnittstellen der Systeme cRIO, DDC und Wetterstation abgeglichen und vor Ort mit dem Projektpartner getestet werden. Die Kommunikation der prozessbeteiligten Komponenten erfolgte ausschließlich über das BACnet-Protokoll. Es konnte sichergestellt werden, dass diesem System ein uneingeschränkter Zugriff auf die Daten der Wetterstation, die anlagenrelevanten Messsignale sowie die Ansteuerungen der notwendigen Aktorsignale für den Boiler und das Mischventil ermöglicht wurde.

Gegenüber den im Kapitel 8.2.3.3 beschriebenen EMPC-Regelungsmethoden wurden innerhalb dieser Versuchsdurchführungen keine zusätzlichen Sicherheits- oder Ausfallmaßnahmen implementiert. Das Risiko einer ggf. auftretenden Unterversorgung eines einzelnen Raumes wurde bewusst toleriert, da diese durch die Nutzung der konventionellen Heizkörper in diesem Raum kurzfristig hätte ausgeglichen werden können.

Als Überwachungsfunktion konnte ein am Echtzeitsystem anschließbarer Monitor genutzt werden, mit dessen Hilfe die LabVIEW-basierte Visualisierung ausgewählter Prozesssignale ermöglicht wurde (siehe Abbildung 8.2.3-23). Damit konnte das zeitliche Anlagenverhalten innerhalb der Real-Time-Applikation in einem rollierenden Zeitbereich von einigen Stunden beobachtet und bewertet werden. Parallel hierzu erfolgte die Speicherung der Messdaten innerhalb des Echtzeitsystems. Diese Daten wurden während der laufenden Versuchsreihen ausgelesen, und dem Projektpartner HAW Hamburg per E-Mail zur Verfügung gestellt. Über diesen elektronischen Weg wurden auch notwendige Programm-Updates ausgetauscht, die in Absprache mit dem Partner dann von Kieback&Peter auf der Hardwareplattform installiert wurden. Die Abbildung 8.2.3-24 gibt einen tabellarischen Überblick über die unterschiedlichen Versuchsphasen zum MPC+ILC am Teststand, die jeweils verwendete Programmversion sowie die Zeiträume der zur Verfügung gestellten Logdateien.

Datum	Version	Testzeitraum		Kommentar
10.03.2017	001	10.03.17	13.03.17	Initiale Programmversion für den MPC+ILC am Teststand
14.03.2017	002	13.03.17	15.03.17	Update mit Fehlerbehebung zur Verwendung der korrekten Wetterprognosen - eingespielt am 15.03.17 Bereitstellung der Logdateien
22.03.2017	003	15.03.17	23.03.17	Update mit Fehlerbehebung - eingespielt am 23.03.17 Bereitstellung der Logdateien
10.04.2017	004	23.03.17	10.04.17	Update mit erweiterter Debugg-Ausgabe - eingespielt am 10.04.17 Bereitstellung der Logdateien
24.04.2017	004	10.04.17	25.04.17	Bereitstellung der Logdateien
11.05.2017	004	10.04.17	11.05.17	Finale Bereitstellung der Logdateien und Beendigung der MPC+ILC Testreihen, danach Beginn der Testreihen zum EMPC am Teststand

Abbildung 8.2.3-24: Testdurchführungen MPC+ILC am Teststand

Die konkreten Versuchsergebnisse auf Grundlage dieser zur Verfügung gestellten Messdaten sind vom Projektpartner HAW Hamburg im AP B.4 – Kapitel 7.4.4.2 „Implementierungsergebnisse“ dokumentiert.

Aus Sicht von Kieback&Peter werden die erzielten Ergebnisse als eine vielversprechende Umsetzung einer modellprädiktiven Regelungsstrategie innerhalb der Testumgebung bewertet. Eine erkennbare Reduzierung der Vorlauftemperaturen wurde in Abhängigkeit der Raumtemperaturen auf Grund des datenbasiert lernenden Anteils sinnvoll bewertet und innerhalb der Testumgebung zielführend umgesetzt. Dabei konnten keine Einbußen bzgl. der thermischen Behaglichkeit erkannt werden.

Da zur Auswertung dieser Methode nur ein kurzfristiger Zeitraum von einigen Tagen herangezogen werden konnte, wären weitere Untersuchungen bei niedrigeren Außentemperaturen über einen längeren Zeitraum durchaus wünschenswert. Diese konnten jedoch innerhalb der Projektlaufzeit nicht realisiert werden, da der Teststand nach Beendigung der Untersuchungen zum MPC+ILC für die im folgenden Kapitel beschriebenen EMPC-Methodik herangezogen wurde.

8.2.3.3 EMPC

Beim EMPC (Economic Model Predictive Control) handelt es sich um eine modellprädiktive Regelungsstrategie, die in Verbindung mit einer linearen Kostenfunktion ein Optimierungsproblem löst. Gegenüber der bereits im Kapitel 8.2.3.2 behandelten MPC-Variante, die mit Hilfe von Wichtungsfaktoren unter Zuhilfenahme eines quadratischen Gütefunktionalen ein regelungstechnisches Optimum ermittelt, können hierbei reale (Anlagen-)Kosten definiert werden, die die betriebstechnischen Prozesse optimieren. Hierzu können zusätzlich Randbedingungen für Eingangs- und Ausgangssignale und deren Änderungen definiert werden, die aus Anlagensicht auf Grund von Prozess-, Sicherheits- oder Behaglichkeitsgründen erforderlich sind.

Die Theorie sowie die Implementierungen zu den modellprädiktiven Regelungsansätzen (MPC+ILC), insbesondere auch zum EMPC mit einer linearen Kostenfunktion, sind im AP B.4 ausführlich behandelt.

8.2.3.3.1 EMPC-Testszenarien

Zu den Vorbereitungen und Realisierungen der EMPC-Regelungsansätze konnten zwei unterschiedliche Demonstrationsumgebungen herangezogen werden, die im Folgenden beschrieben sind.

Der jeweils hierfür verwendete EMPC-Regler wurde vom Projektpartner HAW Hamburg innerhalb des Echtzeitsystems cRIO mit der Systementwicklungssoftware LabVIEW implementiert und Kieback&Peter zur Evaluierung der Methoden zur Verfügung gestellt.

In ersten EMPC-Testläufen wurde jedoch deutlich, dass mit dieser Kombination kein stabiler Betrieb des Reglers über mehrere Tage möglich war. Als Grund hierfür konnte der innerhalb von LabVIEW verfügbare lineare Optimierer identifiziert werden, dessen Algorithmus auf Grund unzureichender Konfigurationsmöglichkeiten keine weiteren Anpassungen zuließ und somit eine weitere Nutzung dieses Systems nicht möglich machte. Aus diesem Grund wurde vom Projektpartner HAW Hamburg eine Ersatzlösung bereitgestellt, die an Stelle des Echtzeitsystems dann mit einer Laptop-basierten Lösung zielführend realisiert werden konnte. Damit wurde der Programmablauf und die BACnet Kommunikation mittels LabVIEW und die Optimierung mit Matlab realisiert.

Teststand:

Mit diesem Testszenario (siehe Kapitel 8.2.3.2.3) konnten zunächst grundlegende Implementierungen im Hinblick auf die systemtechnische Realisierung einer prädiktiven Regelungsstrategie innerhalb eines realen und räumlich begrenzten Anlagenbetriebs umgesetzt und demonstriert werden.

Diese Versuchsumgebung wurde bewusst gewählt, um ein mögliches Fehlverhalten der neuartigen Reglerimplementierung in einem unkritischen Umfeld zu erproben. Da der autark konzipierte Teststand in seiner Funktionsweise auf einen einzelnen Büroraum beschränkt war, konnten hier zunächst vereinfachte Mechanismen etabliert und erprobt werden. Der Fokus lag dabei auf der Realisierung eines leicht wartbaren Testsystems, in dem das kommunikative Zusammenspiel der verwendeten Komponenten und deren Stabilisierung im Vordergrund standen.

Der Versuchsaufbau für die Untersuchungen zum EMPC mit kontinuierlichen Stellsignalen bestand zunächst aus dem Zusammenspiel des Echtzeitsystems cRIO, einer als Gateway in die Anlage fungierenden Automationsstation (DDC4200e) sowie der im Kapitel 8.2.3.2.1. eingeführten Wetterstation. Das cRIO wurde im weiteren Verlauf aus den eingangs erwähnten Gründen durch eine PC-basierte Lösung ersetzt. Die hierfür notwendigen programmtechnischen Änderungen wurden vom Projektpartner HAW Hamburg umgesetzt.

Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale:

Die Erkenntnisse und Erfahrungswerte, die aus dem Test des EMPC mit kontinuierlichen Stellsignalen (siehe AP B.5 - Kapitel 7.6.3.1 „Implementierung eines EMPC mit kontinuierlichen Stellsignalen“) abgeleitet werden konnten, bildeten die Voraussetzung zur Übertragung einer EMPC-basierenden Regelungsstrategie mit kontinuierlichen und diskreten Stellsignalen (siehe AP B.5 - Kapitel 7.6.3.2 „Implementierung eines EMPC mit diskreten Stellsignalen“). Hierzu wurde die im Kapitel 8.2.3.3.2 „Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale“ dokumentierte Produktivanlage herangezogen.

Da der Komplexitätsgrad dieser Anlage mit 7 statischen Heizkreisen und einer 2-stufigen Doppelkesselanlage weitaus höher als in dem bisher verwendeten Teststand war, mussten zur systemtechnischen Anbindung des EMPC an die Anlage vor allem DDC-seitige Implementierungen realisiert werden.

Dazu gehörten vor allem komplexe Umschaltmechanismen für die Aktoren (Kessel und Mischventile), die im Fall einer aktivierten Umschaltung auf den EMPC dann von dort erfolgten. Dabei musste die bestehende Sicherheitskette (Störungsbehandlung, Meldewesen, Handbedienung usw.) innerhalb der Anlagenprojektierung erhalten bleiben. Um etwaige Fehlfunktionen durch die komplette Übernahme der implementierten Regelungsstrategie EMPC auszuschließen, mussten Sicherheits- und Überwachungsmechanismen innerhalb der gebäudetechnischen Anlage etabliert werden. Hierzu wurde ein Konzept für eine Fallbackstrategie realisiert, um eine mögliche Havarie, und damit einen eventuellen Totalausfall der Anlage auszuschließen.

Des Weiteren musste die bestehende Umsetzung der Trinkwarmwasserbereitung, die im Winterbetrieb durch die zentrale Heizwärmeerzeugung gespeist wurde, überarbeitet werden. In den Versuchsphasen erfolgte die Trinkwarmwasserbereitung dann ausschließlich mit Hilfe einer elektrischen Heizpatrone.

Die hierfür notwendigen Implementierungen wurden innerhalb der Automationsstation realisiert und beinhalteten die folgenden Maßnahmen, die gegenüber der im Kapitel 8.2.3.2 beschriebenen Integrationsarbeiten in diesem Umfeld zusätzlich notwendig waren:

- Schaffung einer manuellen Umschaltmöglichkeit auf die unterschiedlichen Regelungsmethoden EMPC/AMPC-SL (siehe hierzu auch Kapitel 8.2.3.1 – „AMPC-SL“)
- Umschaltung für die Ansteuerung beider Kessel und deren Stufen (Aus/Stufe1/Stufe2)
- Umschaltung der Ansteuerung der sieben Mischventile der statischen Heizkreise
- Entkopplung der Trinkwarmwasserbereitung von der Wärmebereitstellung durch die Kesselanlage (incl. Umschaltmöglichkeit der Warmwasserbereitung konventionell bzw. elektrische Heizpatrone)
- Etablierung von Raumtemperatursensoren (EG – 5.OG) zur Bewertung der Raumkonditionen und zur Ableitung von Randbedingungen
- Implementierung einer „EMPC-Überwachung“ incl. einer Fallback-Strategie auf die konventionelle Regelung
 - Detektion möglicher Anlagenunterversorgung im Zubringersystem RLT
 - Sicherstellung einer minimalen Medientemperatur
 - Auswertung eines Keep-Alive-Signals
- Abgleich, Bereitstellung und BACnet-seitige Anbindung der Parameter zur Übernahme der EMPC-Regelung (incl. Funktionstests)
- Abschätzung einer anlagenspezifischen Kostenfunktion

Im Folgenden werden diese Umsetzungen exemplarisch dargestellt. Die umfangreichen Änderungen und fehlende Funktionen wurden mit bestehenden Werkzeugen von Kieback&Peter innerhalb der DDC über eine geeignete Anlagenprojektierung realisiert und konnten ausgiebig, auch mit dem Projektpartner HAW vor Ort, getestet werden.

Um eine generelle Umschaltung zwischen der bis dahin im Demonstrationsgebäude „Kieback&Peter-Zentrale“ verwendeten konventionellen Regelung und der „Regelung nach EMPC“ zu realisieren, wurde innerhalb der Kundenebene zusätzlich ein „OBSERVE Aus-Ein-Schalter“ etabliert. Mit dieser Umschaltung auf die EMPC-Regelungsmethode konnte wahlweise auch die Methodik des AMPC-SL (siehe Kapitel 8.2.3.1) innerhalb des 4. OG aktiviert werden (Schalterstellung: „OBSERVE AMPC“). Hierzu waren weitere Projektierungsmaßnahmen notwendig, da die für die statische Heizung im 4.OG zur Verfügung gestellte Vorlaufsolltemperatur über eine Fühlerumschaltung sowie unter Ausschluss einer Nachtabenkung realisiert wurde.

Über eine aktivierte Umschaltung gemäß „OBSERVE EMPC Auto“ (siehe Abbildung 8.2.3-25) erfolgte eine überwachte EMPC Regelung, die im Fehlerfall eine Störung

auslöste und auf die konventionelle Regelung zurück schaltete. Mit Hilfe der Schalterstellung „OBSERVE Aus“ konnte die Anlage auf die ursprüngliche Kieback&Peter-Regelung umgeschaltet werden. Über die Aktivierung von „OBSERVE EMPC Zwang“ konnte eine manuelle Fortführung der EMPC-Versuche unter Ausschluss der o.g. Überwachungsfunktion für Test- und Debugging-Zwecke erfolgen.

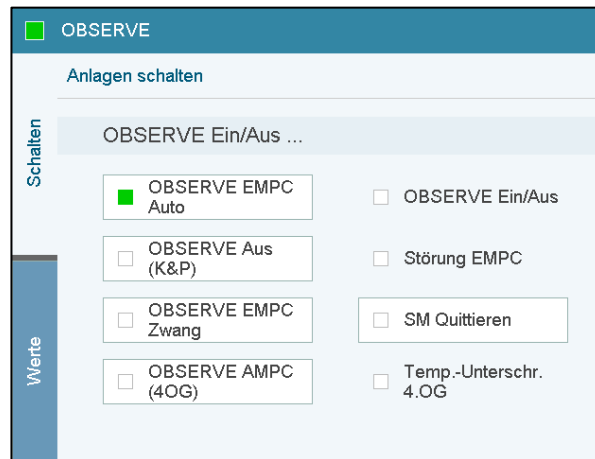


Abbildung 8.2.3-25: Umschaltung der Regelungsstrategie EMPC/AMPC

Bei den modelprädiktiven Regelungsansätzen (EMPC und AMPC-SL) erfolgte die notwendige Entkoppelung der Warmwasserbereitung (WWB) von der Primäranlage durch einen manuellen Umschalter, wobei die Warmwasserladung dann ausschließlich über die elektrische Heizpatrone erfolgte (siehe Abbildung 8.2.3-26)

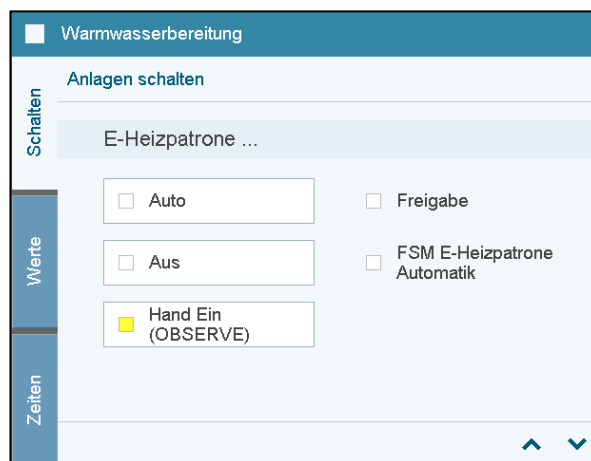


Abbildung 8.2.3-26: Umschaltung der WWB auf Heizpatrone

Zur Umsetzung einer tragfähigen EMPC-Ausfallüberwachung wurden Anlagenteile auf Unterschreitung ausgewählter Medientemperaturen überwacht. Hierzu wurden diverse Grenzwertkriterien innerhalb der Wärmeerzeugung sowie in dem nachgelagerten Zubringersystem der RLT-Anlagen implementiert, deren Regelung unverändert mit dem konventionellen Regelungskonzept fortgeführt wurde. Zur weiteren Überwachung wurden die zusätzlich installierten Raumtemperatursensoren in den

einzelnen Etagen (EG bis 5.OG) herangezogen, um damit eine thermische Unterversorgung des Gebäudes rechtzeitig zu erkennen.

In Absprache mit dem Projektpartner HAW konnte ein vom Optimierungsalgorithmus über BACnet bereitgestelltes „Keep-Alive-Signal“ zur Verfügung gestellt werden. Hiermit konnte innerhalb der Automationsstation eine Aussage abgeleitet werden, ob der EMPC-Algorithmus noch plausible und korrekte Berechnungen liefert. Die Abbildung 8.2.3-27 zeigt die aktivierte Auswertung des Keep-Alive-Signals sowie die Bereitstellung der ebenfalls über BACnet angebundenen Ansteuerungssignale der beiden Wärmeerzeuger (Kessel 1 und 2) innerhalb der Kundenebene.

The screenshot shows a software interface titled 'OBSERVE' with a green status indicator. Below the title is a section 'BACnet aus EMPC'. On the left, there are two vertical labels: 'Schalten' (Switch) and 'Werte' (Values). The main area contains four rows of controls:

Parameter	Value	Icon
KeepAlive-Toggle EMPC (Aus/Ein alle 5 Min):	Ein	✎
Verbindungsüberwachung (M.04):	Aus	
Kesselkreis Kessel 1 E/A:	Stufe 1	✎
Kesselkreis Kessel 2 E/A:	Aus	✎

Abbildung 8.2.3-27: Verwendung des Keep-Alive-Signals

Die DDC-seitige Anlagenprojektierung wurde so umgesetzt, dass eine Unterbrechung der gesamten Bewertungskette (hierzu zählten auch die bisherigen konventionell etablierten Störungsmechanismen) zu einer automatischen Umschaltung auf die konventionelle Regelung geführt hätte. Die EMPC-Regelungsstrategie wäre damit sofort beendet worden und in Form einer zusätzlich erzeugten Störmeldung ersichtlich.

Zur parallelen Überwachung der regelungs- und anlagentechnischen Funktionalitäten wurden alle relevanten Eingangs- und Ausgangssignale innerhalb einer Gebäudeleittechnik (GLT) von Kieback&Peter aufgeschaltet, und konnten somit auch für weitere Auswertungen herangezogen werden.

Abschätzung einer Kostenfunktion:

Für den eingesetzten EMPC-Algorithmus wurde von Kieback&Peter dem Projektpartner HAW eine Kostenfunktion zur Verfügung gestellt, deren Abschätzung sich exemplarisch auf den leistungsstärkeren Kessel 2 (230 KW) in der Demonstrationsanlage Kieback&Peter-Zentrale bezieht. Details zu dieser hausintern erfolgten Bewertung sind der Abbildung 8.2.3-28 zu entnehmen. Hierbei wird deutlich, dass die Betriebskosten primär durch die Energiekosten der Wärmeerzeuger verursacht werden und somit der Anteil für die Wärmeverteilung über die jeweiligen Mischventile verschwindend gering ausfallen.

Kosten für Nachspülen	Kosten für Vorspülen und thermische Verluste	Kosten für Vorspülen und elektrische Verluste	Betriebskosten Brenner mit Flamme	Stellschritt vom Mischer elektrische Verluste	Kommentar
- Keine - Bei dem verwendeten Brenner gibt es keine Nachspülfunktion	Vorspülzeit: 14 Sekunden Elektrischer Anschluss des Brenners: 450 W Nennleistung Annahme: Tatsächliche Leistung während des Vorspülens: 300 W Teillast des Kessels lt. Messprotokoll: 175kW, entspricht bei 10kW/Liter Heizwert einen Oldurchsatz von 17,5 Liter/Stunde Daraus ergibt sich rechnerisch ein Luftmassenstrom bei Teillast von 175 kW: => 266,8 m³/h Somit ergibt sich ein Wärmeverlust auf Grund einer Vorspülung in Höhe von 0,052 kWh Kosten/kWh: 6 ct/kWh Kosten/Vorspülung: 6 ct/kWh * 0,052 kWh = 0,3 ct	Vorspülzeit: 14 Sekunden Elektrische Antriebsleistung des Brenner: 300 W Kosten/kWh: 25 ct/kWh Elektrische Energie/Vorspülung: 4200 WS = 0,0012 kWh Kosten/Vorspülung (elektrisch): 24 ct/kWh * 0,0012 kWh = 0,03 ct	175 kW entspricht bei 10 kWh/l einem Verbrauch von 17,5 l/h Kosten/l: 60 ct Kosten Öl: 10,5 €/h Elektrischer Verbrauch bei 300 W: 0,3 kWh Energiekosten Strom: 25 ct/kWh Kosten Strom: 7,5 ct/h Gesamtkosten Betrieb Brenner mit Flamme: 10,6 €/h	Elektrische Anschlussleistung vom Mischer: 4,5 VA Mittlere tatsächliche Leistungsaufnahme vom Mischer: 3 W (Schätzung) Energiekosten Strom: 23 ct/kWh Kosten Strom pro Stellschritt: $6,25 \cdot 10^{-5}$ ct	Die erfolgten Berechnungen zur Abschätzung der EMPC-Kostenfunktion beruhen teilweise auf Annahmen sowie auf Angaben eines vorliegenden Messprotokolls des großen Kessels (230kW). Die Angaben können daher nur für eine grobe Kostenabschätzung herangezogen werden.

Abbildung 8.2.3-28: Abschätzung der EMPC-Kostenfunktion

8.2.3.3.2 Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale

Bei dem Demonstrationsgebäude von Kieback&Peter handelt es sich um ein typisches Nichtwohngebäude welches als Büro- und Verwaltungsgebäude konzipiert wurde. Das sieben-geschossige Bestandsgebäude (siehe Abbildung 8.2.3-29) wurde 1992 errichtet und beinhaltet im Wesentlichen Einzel- und Gruppenbüros. Neben Besprechungsräumen in den einzelnen Etagen, sind im 5. OG zusätzlich großflächige Schulungsräume etabliert, die mit dezentralen RLT-Anlagen ausgerüstet sind.



Abbildung 8.2.3-29: Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale

Alle Räume verfügen über raumhohe Fensterverglasungen, die mit außenliegenden Jalousien als Sonnenschutz versehen sind. Im Dachgeschoß befindet sich ausschließlich ein Küchen-/Kantinenbereich, der einen Zugang zur teilweise offenen

Dachterrasse liefert. Das Gebäude ist komplett unterkellert und beherbergt zwei Tiefgaragenebenen.

Zur Wärmeerzeugung ist das Gebäude mit einer Nettogrundfläche von 3716 m² mit zwei 2-stufigen, ölbefeuerten Heizkesseln unterschiedlicher Leistung (140 bzw. 230 kW) ausgestattet. Die Kessel werden durch die nachgeschalteten Verbraucher angefordert. Diese setzen sich aus den angeschlossenen statischen Heizkreisen (EG bis 6.OG) zusammen, die gemäß einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung pro Etage ausgeführt sind (siehe Abbildung 8.2.3-30). Darüber hinaus werden die RLT-Anlagen über einen separaten Zubringerkreis (für Schulungs- und Konferenzräume), sowie eine zentrale Warmwasserbereitung (WWB) mit einem 200 Liter Speicher versorgt. Bei einer Anforderung der Warmwasserbereitung im Winterbetrieb wird den Wärmeerzeugern hierzu ein Mindestsollwert übergeben. Im Sommerfall wird die WWB aus Effizienzgründen über eine elektrische Heizpatrone betrieben. Der Wechsel zwischen Führungs- und Folgekessel findet über die Außentemperatur statt. Eine manuelle Kesselauswahl sowie eine wöchentliche Zwangsumschaltung sind ebenfalls möglich.



Abbildung 8.2.3-30: Heizungszentrale Kieback&Peter

Die strombetriebenen Kompressionskältemaschinen (3x 45kW) befinden sich auf dem Dach des Gebäudes, und versorgen die angeschlossenen RLT-Anlagen mit Kälte. Die Kälteanlage wurde jedoch im Rahmen des Projekts OBSERVE nicht betrachtet.

Zur Erfassung der elektrischen Lasten des Gebäudes sind Elektrozähler in den Etagen installiert. Die steuer- und regelungstechnischen Aufgaben in diesem Objekt werden von mehreren Automationsstationen übernommen. Neben der Anbindung von benötigter Sensorik und Aktorik auf Feldebene steht auch eine Managementebene in Form einer BACnet-fähigen Gebäudeleittechnik (GLT) zur Verfügung.

8.2.3.3.3 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Die Umsetzungen der EMPC-basierten Regelungsmethoden konnten in zwei realen Anlagen von Kieback&Peter erprobt und evaluiert werden. Hierzu wurde zunächst der Teststand für kontinuierliche Stellsignale herangezogen. Im weiteren Projektverlauf erfolgte dann die Umstellung innerhalb des Demonstrationsgebäudes „Kieback&Peter“ (siehe Kapitel 8.2.3.3.2) für schaltende und kontinuierliche Stellsignale. Die verwendeten Versuchsumgebungen wurden bereits im Kapitel 8.2.3.3.1 „EMPC-Testszenarios“ beschrieben. Die im Folgenden verwendeten Abbildungen wurden mit Hilfe einer von Kieback&Peter bereitgestellten Gebäudeleittechnik (GLT) realisiert, auf der die relevanten Messdaten während der unterschiedlichen Versuchsdurchführungen aufgeschaltet waren.

Versuchsdurchführungen am Teststand:

Die Versuchsdurchführung erfolgte in Analogie zu dem bereits in Kapitel 8.2.3.2.4 „MPC+ILC-Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse“ vorgestellten technischen Umfelds. Der prinzipielle Aufbau des Teststands konnte unverändert übernommen werden, jedoch musste die Reglerimplementierung wie in Kapitel 8.2.3.3.1 beschrieben auf einem PC-basierten System erfolgen. Hierzu wurde vom Projektpartner HAW Hamburg ein Laptop zur Verfügung gestellt, der mit entsprechender Softwaresystemumgebung (Matlab und LabVIEW) ausgestattet war. Die zuvor definierten Schnittstellen konnten während eines gemeinsamen Inbetriebnahmetermins in Form von 1:1-Test erfolgreich getestet werden. Somit war sichergestellt, dass sowohl die Leistung des Boilers als auch das Stellsignal des 4-Wege-Ventils korrekt über den EMPC-Algorithmus angesteuert werden konnten. Der Zugriff auf die Temperaturprognosen der Wetterstation konnte hierbei ebenfalls verifiziert werden.

Datum	Version	Testzeitraum		Kommentar
02.11.2017	000	02.11.17		Inbetriebnahme des EMPC am Teststand (2.OG): Initiale Programmversion, Durchführung von 1:1-Tests und Anbindung der Wetterstation via BACnet Initiale Korridore der Raumtemperatur: 22°C bis 26°C (EG-6.OG)
03.11.2017	000	02.11.17	03.11.17	Bereitstellung erster Messdaten
06.11.2017	000	02.11.17	06.11.17	Update der Messdaten
07.11.2017	001	07.11.17		Program-Update „Nachtabenkung“ (maximal -3K erlaubt)
10.11.2017	001	07.11.17	10.11.17	Update der Messdaten
15.11.2017	001	07.11.17	15.11.17	Update der Messdaten
23.11.2017	001	07.11.17	23.11.17	Update der Messdaten und Beendigung der Messung am Teststand, Vorbereitungen zur Umstellung auf das Demonstrationsgebäude K&P-Zentrale

Abbildung 8.2.3-31: Testdurchführungen EMPC am Teststand

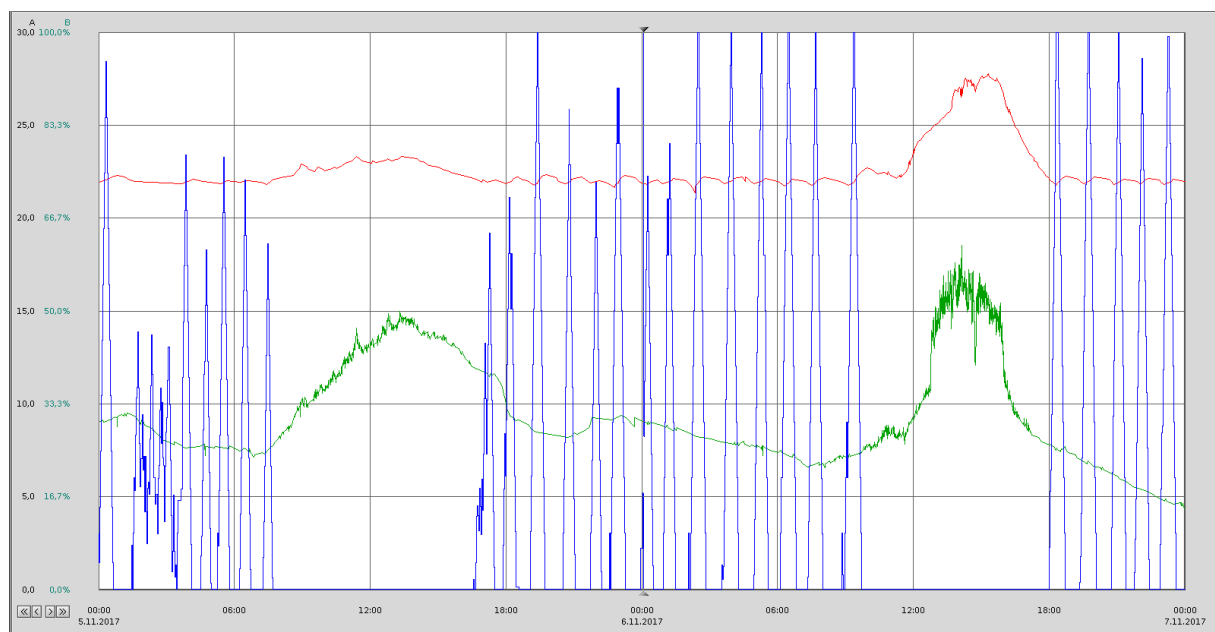
Die wichtigsten Mess- und Prozessdaten konnten mit dem PC-System zur Kontrolle des Anlagenverhaltens während der Versuchsdurchführung angezeigt und plausibilisiert werden. Sowohl das Speichern der relevanten Daten, als auch das Einspielen von notwendigen Programm-Updates auf dem Laptop gestaltete sich problemlos. Der erforderliche Datenaustausch sowie die Bereitstellung von Programmänderun-

gen mit dem Projektpartner HAW erfolgten per E-Mail. Darüber hinaus fand ein stetiger Informationsaustausch über zahlreiche Telefonkonferenzen statt. Die Abbildung 8.2.3-31 verdeutlicht die verwendeten EMPC-Testzeiträume, die Nutzung der unterschiedlichen Programmversionen sowie die Bereitstellung der gewonnenen Messdaten an den Projektpartner HAW.

Die Ergebnisse zu den EMPC-Untersuchungen mit dem Teststand sind im AP B.4 – Kapitel 7.6.3.1 „Implementierung eines EMPC mit kontinuierlichen Stellsignalen“ bereits dokumentiert und werden im Folgenden kurz zusammengefasst sowie mit Abbildungen aus der hauseigenen Kieback&Peter-GLT verdeutlicht.

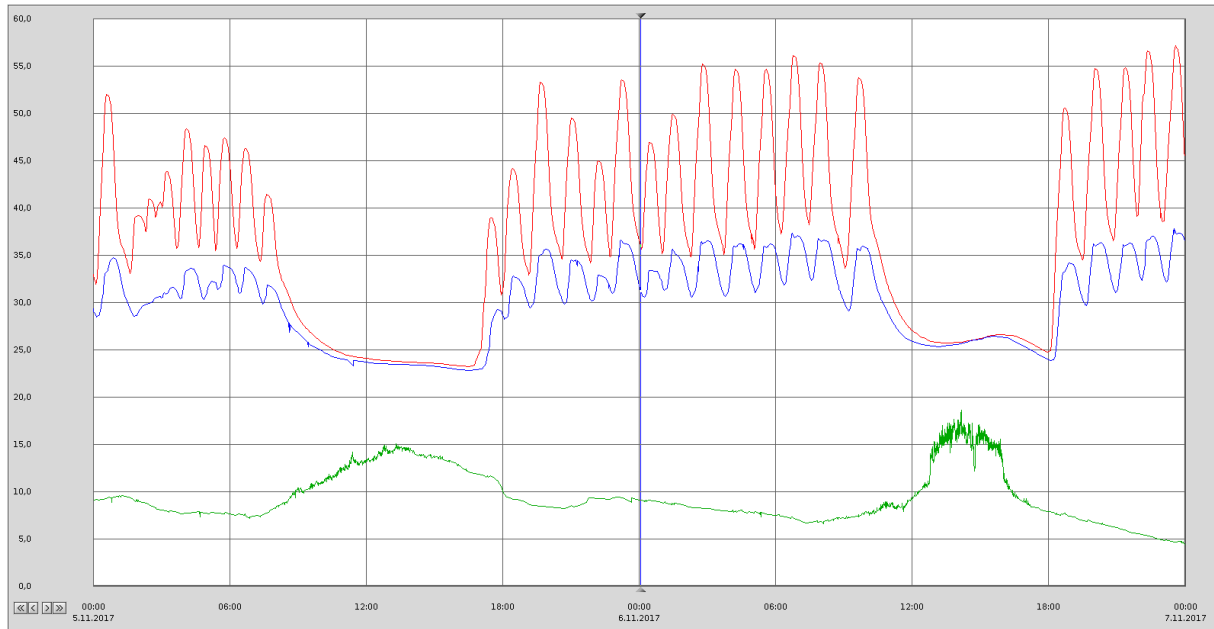
Aus diesen Untersuchungen konnten zwei wesentliche Erkenntnisse abgeleitet werden, die den erwarteten regelungstechnischen Ablauf des EMPC am Teststand widerspiegeln.

Es konnte zum einen gezeigt werden, dass die Raumtemperaturen innerhalb einem festgelegten Korridor (22°C bis 26°C) gehalten werden, obwohl zur Ermittlung der in das System eingebrachten Wärmeenergie keine wie sonst übliche Referenz wie z.B. eine Heizkurve verwendet wurde. Dieser Umstand wird in der Abbildung 8.2.3-32 deutlich. Gezeigt wird hier ein Verlauf der Raumtemperatur (rot), der Außentemperatur (grün) sowie die stetige Ansteuerung des Wärmeerzeugers/Boilers (blau / Skalierung: 0-100%) innerhalb des Zeitraums vom 05. bis 07.11.2017. Erkennbar ist bei einer Zunahme der Raumtemperatur oberhalb von 22 °C eine gleitende Reduzierung der Boilerleistung. Wird der gewünschte untere Raumtemperaturbereich weiterhin überschritten, so wird die Ansteuerung des Boilers sukzessive bis auf 0% (Boiler=Aus) reduziert. Am 06.11.2017 wurde die Raumtemperatur im Laufe des Vormittags auf Grund der solaren Einstrahlung in diesen Raum stark angehoben. Der Boiler forderte erst dann wieder Wärme an, wenn die Raumtemperatur die 22°C-Grenze unterschritten hatte.



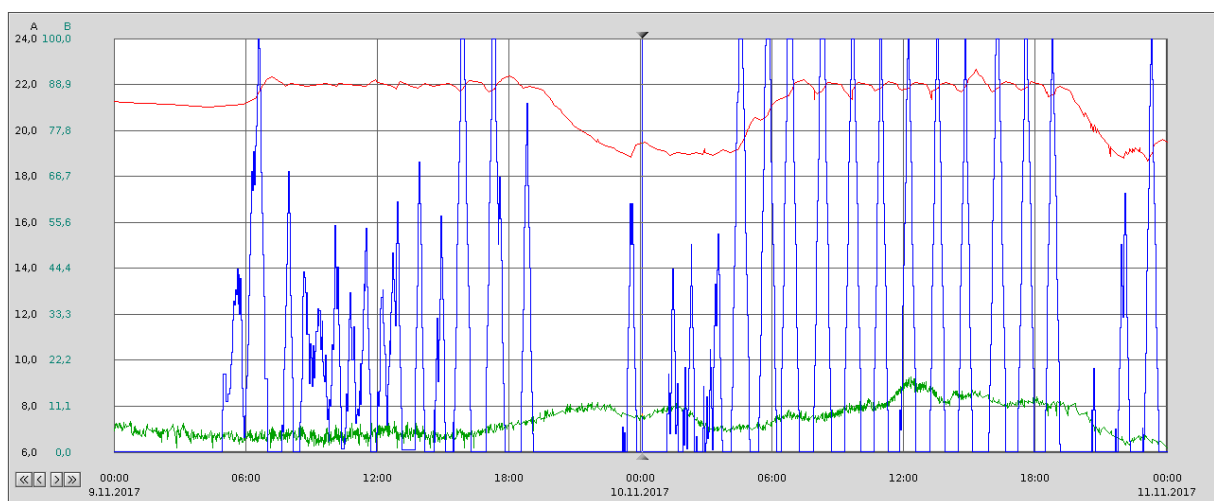
**Abbildung 8.2.3-32: Messergebnisse EMPC am Teststand
Raum- und Außentemperatur (rot / grün), Boileransteuerung (blau)**

Die Abbildung 8.2.3-33 veranschaulicht hier noch deutlicher, dass sich die aus dem EMPC ergebenden Vorlauftemperaturen (rot) nicht auf Grund einer Außentemperatur (grün) ableiten. Zusätzlich kann aus der Differenz zwischen der Vorlauf- (rot) und Rücklauftemperatur (blau) in den Nachstunden eine hohe Temperaturspreizung abgelesen werden. Da tagsüber die Raumtemperaturen im definierten Korridor liegen, ist hier kein Heizbetrieb notwendig (Sommerabschaltung).



**Abbildung 8.2.3-33: Messergebnisse EMPC am Teststand
Vor- und Rücklauftemperatur (rot / blau), Außentemperatur (grün)**

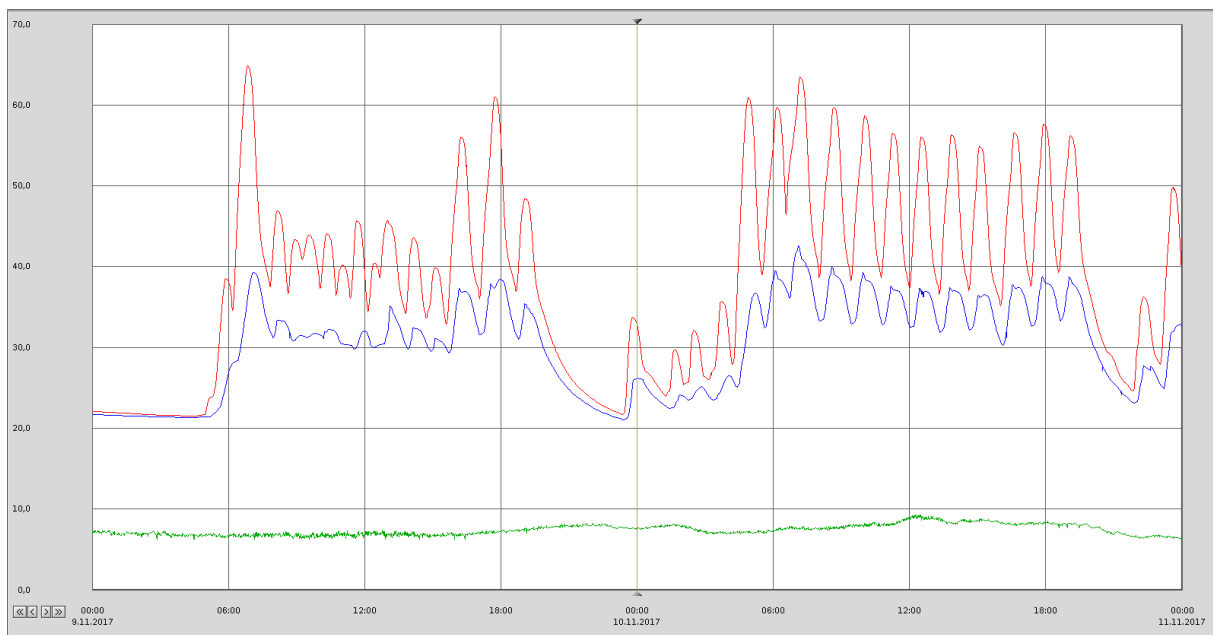
Zum anderen konnte gezeigt werden, dass durch die Definition von zeitlichen Randbedingungen eine Nachtabenkung mit dem EMPC möglich war. Die Abbildung 8.2.3-34 zeigt eine 2-tägige Messung (09.-10.11.2017), bei der in der Zeit von 19 bis 06 Uhr eine reduzierte Raumtemperatur von 19°C als Randbedingung erlaubt war.



**Abbildung 8.2.3-34: Messergebnisse EMPC am Teststand mit Nachtabenkung
Raum- (rot), Außentemperatur (grün), Boieransteuerung (blau)**

Somit ergaben sich die Raumtemperaturen (rot) innerhalb der erlaubten nächtlichen Zeiten um 3 Kelvin reduziert. Bei einer drohenden Unterschreitung der Raumtemperatur unterhalb der erlaubten 19°C-Grenze wurde auch nachts temporär der Boiler (blau) kurzzeitig in Betrieb genommen, um diese minimal geforderte Raumtemperatur zu realisieren.

Die in diesen Zeitraum gemessenen Vorlauf- (rot) und Rücklauftemperaturen (blau) können der Abbildung 8.2.3-35 entnommen werden. Eine Abhängigkeit zur Außentemperatur (grün) ist hier auf Basis des EMPC nicht gegeben.



**Abbildung 8.2.3-35: Messergebnisse EMPC am Teststand mit Nachtabenkung
Vor- und Rücklauf-temperatur (rot / blau), Außentemperatur (grün)**

Mit diesen Erkenntnissen, die aus den Versuchsphasen innerhalb des Teststands gewonnen wurden, erfolgte dann die Übertragung der EMPC-Regelungsstrategie auf die Anlage innerhalb des Demonstrationsgebäudes Kieback&Peter-Zentrale.

Versuchsdurchführungen am Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale:

Die EMPC-basierte Regelung konnte im Demonstrationsgebäude „Kieback&Peter-Zentrale“ mit der Heizungsanlage demonstriert und evaluiert werden. Dabei wurden die Signale aller sieben statischen Heizkreise mit den dazugehörigen Mischventilen sowie die beiden zweistufigen Wärmeerzeuger an die EMPC-Regelung übergeben und realisierten damit eine direkte Ansteuerung der Aktoren. Die hierfür notwendigen Umschaltmechanismen wurden, wie bereits beschrieben, innerhalb der umfassenden Projektierungsanpassungen in der DDC realisiert.

Das Grundkonzept zur Versuchsdurchführung wurde dabei genauso umgesetzt, wie beim EMPC im Teststand, wobei in diesem Fall die Reglerimplementierung des Projektpartners HAW Hamburg für schaltende und kontinuierliche Signale verwendet wurde.

Als regelungstechnische Randbedingungen für den EMPC wurden hierzu Vorgaben für die minimale und maximale Kesseltemperatur, das RLT-Zubringersystem sowie

die etagenabhängigen Raumtemperaturkorridore definiert. Die zulässigen Raumtemperaturbereiche wurden von Kieback&Peter während der Versuchsdurchführungen in Absprache mit dem Projektpartner in den unteren Etagen (EG bis 2.OG) nutzerabhängig angepasst.

Als Besonderheit für die Integration des EMPC in diesem Demonstrationsgebäude wurden, wie bereits im Kapitel 8.2.3.3.1 „EMPC-Testszenarien“ ausführlich beschrieben, umfangreiche Ausfallüberwachungen DDC-seitig implementiert, um einen störungsfreien Betrieb der Anlage sicher zu stellen. Diese Umsetzungen haben sich, wie im Folgenden gezeigt wird, als praktikable und notwendige Lösung erwiesen.

Die Inbetriebnahme im Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale erfolgte am 27. und 28.11.2017 in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner HAW Hamburg. Hierbei konnte das kommunikative Zusammenspiel der Komponenten PC-basierte Reglerimplementierung, DDC der Produktivanlage und der Wetterstation mit den im Vorfeld von Kieback&Peter erstellten Konzepten getestet und als tragfähige Umsetzung bestätigt werden. Im weiteren Verlauf der Evaluierungsarbeiten wurden von Kieback&Peter dann eigenständige Tests durchgeführt.

Datum	Version	Testzeitraum		Kommentar
27.+28.11.2017	001			Inbetriebnahme EMPC am Demonstrationsgebäude K&P-Zentrale, initiale Programmversion: 1:1-Tests erfolgreich, etagenabhängige Korridore für die Raumtemperaturen im EG - 6.OG (22-26 °C), Minimal- und Maximalgrenzen für RLT-Zubringersystem (40-80 °C) sowie der Kesseltemperaturen (50-80 °C)
29.12.2017	001	29.11.17	29.11.17	1. Testlauf, Überprüfung und Plausibilisierung des Anlagenverhaltens sowie der DDC-Projektierung, Anlegen von Trendwerten in der GLT, Bereitstellung erster Messdaten am 30.11.17
01.12.2017	001	01.12.17	01.12.17	Automatische Umschaltung auf K&P-Regelung auf Grund fehlender Kommunikation der Systeme untereinander, Neustart des Laptop und Routers durchgeführt, Bereitstellung von Messdaten
02.12.2017	001	01.12.17	02.12.17	Abbruch und automatische Umschaltung auf K&P-Regelung, Lösung des Optimierers benötigte teilweise mehr als 5 Minuten
08.12.2017	002			Programm-Update (Keep-Alive-Signal auf 7 Minuten erhöht)
11.12.2017	002	08.12.17	11.12.17	Abbrüche und automatische Rückschaltung auf K&P-Regelung am 08.,10. und 11.12.17 Bereitstellung der bis dahin erfassten Messdaten
15.12.2017	003			Programm-Update (Keep-Alive-Signal auf 20 Minuten erhöht, zusätzliche Ausgaben für die tatsächlichen Berechnungszeiten)
16.12.2017	003	15.12.17	16.12.17	Programmabbruch, Optimierer findet keine Lösung Bereitstellung der Messdaten incl. Log-Files
19.12.2017	004	19.12.17		Programm-Update („try and catch-Funktion“). Das Fehlen einer Lösung nach maximal 20 Minuten löst einen Fehler aus (Keep-Alive-Signal = true) und erlaubt erst dann eine automatische Rückschaltung auf die K&P-Regelung
21.12.2017	004	19.12.17	21.12.17	Tests für diesen Zeitraum ohne Probleme, Bereitstellung der Messdaten am 21.12.18, Beendigung der EMPC-Testläufe am Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale, manuelle Rückschaltung auf K&P-Regelung

Abbildung 8.2.3-36: Testdurchführungen EMPC / Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale

Die Abbildung 8.2.3-36 verdeutlicht die EMPC-Testzeiträume, die erforderlichen Programm-Updates sowie die Schwierigkeiten, die während der einzelnen Versuchsphasen aufgetreten sind. Dabei wird deutlich, dass es bei den Testfällen häufig zu unerwarteten Programmabbrüchen kam. Diese wurden jedoch durch die im Vorfeld implementierte automatische Umschaltung auf die konventionelle Kieback&Peter-Regelung abgefangen, und führten damit nicht zu einem Ausfall der Anlage.

Als Gründe für diese Testunterbrechungen konnten neben unerwarteten Kommunikationsabbrüchen vor allem das nicht erfolgte Finden einer Lösung für das eigentliche Optimierungsproblem einer modellprädiktiven Regelung in einem definierten Zeitbereich identifiziert werden. Konnte die Lösung im EMPC-Algorithmus nicht innerhalb einer vorgegebenen Zeit ermittelt werden, wurde über das Keep-Alive-Signal ein nichtkonsistentes Verhalten abgeleitet und löste damit die beschriebene automatische Umschaltung auf die konventionelle Kieback&Peter-Regelungsstrategie aus. Im weiteren Verlauf der Evaluierungsarbeiten wurden daraufhin vom Projektpartner HAW Hamburg Programmanpassungen notwendig. Auf Grund dieses iterativen Prozesses konnte dann eine stabile Version vom Projektpartner zur Verfügung gestellt werden.

In der restlichen Zeit bis zum Projektende blieben daher nur wenige Tage, in denen eine Methodenevaluierung des EMPC innerhalb dieser Anlage möglich war. Die vom Projektpartner HAW Hamburg vorgelegten Ergebnisse sind im AP B.4 – Kapitel 7.6.3.2 „Implementierung eines EMPC mit kontinuierlichen und diskreten Stellsignalen“ dokumentiert.

Exemplarisch wird in der Abbildung 8.2.3-37 das EMPC-basierte Anlagenverhalten für das Erdgeschoss in dem Zeitraum vom 20. bis 22.12.2017 dargestellt.

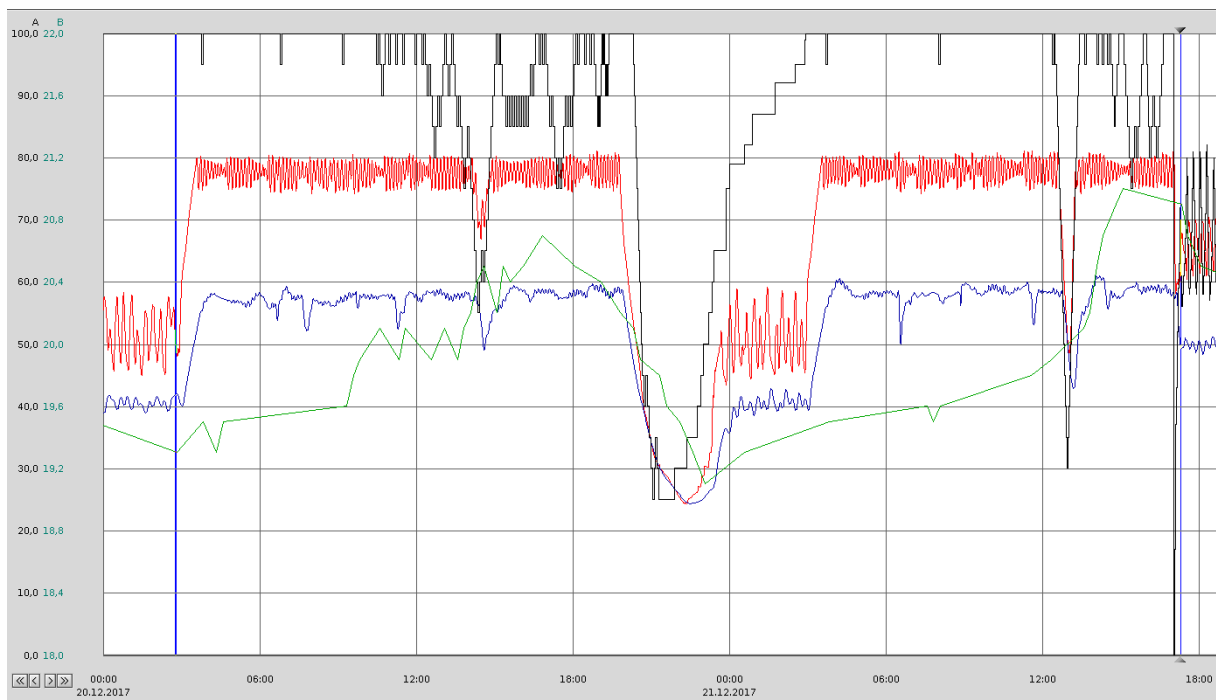


Abbildung 8.2.3-37: Messergebnisse EMPC-Kieback&Peter-Zentrale (EG)
Vor- und Rücklauftemperatur (rot / blau), Heizventil (schwarz), Raumtemp. (grün - Skalierung B)

Hierbei wird deutlich, dass der Heizkreis schon vor den festgelegten Nutzungszeiten (06:00 bis 20:00 Uhr) mit thermischer Energie durch eine deutliche Anhebung der Vorlauftemperatur (rot) versorgt wird. In den Fällen, in denen die Raumtemperatur (grün) während der Betriebszeit die untere Grenze eines vorgegebenen „Komfortbereichs“ (20 bis 22 °C) überschreitet, ist eine Kompensation zunächst durch die Reduzierung des Vorlaufs als auch das Zufahren des Heizventils (schwarz) erkennbar. Am Ende des ersten Tages fällt die Vorlauftemperatur bis auf die vereinbarte minimale Grenztemperatur von 30°C ab und realisiert damit eine deutlich erkennbare Nachtabsenkung. Am Folgetag wird dann vor dem Nutzungszeitbeginn zunächst das Ventil aufgefahren, und ein reduziertes Energieangebot bereitgestellt. Nach der kompletten Öffnung des Heizventils wird die Vorlauftemperatur auf seinem Maximalwert gehalten, um damit den „Komfortbereich“ rechtzeitig zu erreichen.

8.2.4 Demonstrator Fehlererkennung

Im nachfolgenden **Kapitel 8.2.4.1** wird zunächst der Aufbau einer flexiblen Testumgebung zur Erprobung von Methoden zur automatischen Fehlererkennung mit Kopplung über BACnet/IP zu einem Demonstrationsgebäude aus OBSERVE, im vorliegenden Fall der Kieback&Peter-Zentrale, vorgestellt.

Anschließend erfolgt die Beschreibung der Integration „Qualitativer Modelle“ (QuaMo) auf einem „Demonstratormodul Fehlererkennung“, sowie die Präsentation erster Ergebnisse, die damit in der Heizperiode 2017/2018 erzielt werden konnten. Die Implementierung der „Qualitativen Modelle“ wurde dabei von Kieback&Peter in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner „Fraunhofer ISE“ durchgeführt.

Darüber hinaus werden in **Kapitel 8.2.4.2** neben der regelbasierten Integration der QuaMo-Ergebnisse exemplarisch auch der Entwurf, die Implementierung und Evaluierung weiterer WENN-DANN-Regeln zur Fehlererkennung auf dem Demonstratormodul mit den Anwendungsschwerpunkten „Kesselanlage“, „hydraulische Weiche“, „statische Heizkreise“ und „Warmwasserbereitung“ aufgezeigt.

8.2.4.1 Qualitative Modelle (QuaMo)

Dieses Kapitel beschreibt die Integration der QuaMo-Fehlererkennungsmethode des Projektpartners Fraunhofer ISE auf dem Kieback&Peter „Demonstratormodul Fehlererkennung“, die Anbindung an das Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale in der von Kieback&Peter aufgebauten Testumgebung und die Durchführung der Evaluation.

8.2.4.1.1 Testumgebung und Implementierung

Vor dem Start der Implementierungs- und Evaluationsarbeiten von Kieback&Peter im Projekt wurde mit den Projektpartnern abgestimmt, dass neben verschiedenen Regelungsstrategien (AMPC-SL, EMPC) und regelbasierten Fehlererkennungsmethoden (WENN-DANN-Fehlerregeln) auch die Eignung Qualitativer Modelle zur Fehlererkennung in einem Subsystem des Demonstrationsgebäudes Kieback&Peter-Zentrale untersucht wird.

Dabei benötigen diese Methoden Daten aus den unterschiedlichsten Anlagen-segmenten des Demonstrationsgebäudes, von diversen Automationsstationen, Gateways und weiteren Datenquellen.

Zu integrieren sind Messwerte und Anlagenzustände, Wetterprognosedaten, Messdaten aus der Primäranlage (Doppelkesselanlage) und den Verbraucherkreisen (statische Heizkreise, RLT-Anlagen und Brauchwasserkreis) sowie dezentral erfasste Raumtemperaturen aus mehreren Etagen. Im Falle der Regelungsstrategien ist auch ein Zurückspielen von Werten (Sollwerte, Stellbefehle) in die Anlage erforderlich.

Hierfür wurde von Kieback&Peter ein zweiteiliges Integrationskonzept für eine Test-umgebung entworfen und umgesetzt.

Zum einen wurde zur Bereitstellung insbesondere der folgenden Funktionen eine speziell projektierte Automationsstation von Kieback&Peter (DDC4200e) in einem flexiblen, transportfähigen Einsatzrahmen verwendet:

1. Bündelung der im Projekt benötigten Datenpunkte der verschiedenen Anlagen-Komponenten und –Subsysteme im Demonstrationsgebäude
2. Schaffung von Testmöglichkeiten zur Methodenevaluierung. Hierzu zählen vor allem Möglichkeiten zur gezielten „Fehlerinjektion“ durch
 - a. manuelle oder automatisierte Überlagerung von realen Messdaten-signalen mit additiven Fehler-Offsets
 - b. Fühlerumschaltung auf über BACnet zyklisch in Echtzeit von einem Demonstratormodul eingespielte, simulierte oder historische Daten
3. Entkopplung der parallelen Datenanforderungen der auf den Demonstrator-modulen implementierten Regelungs- (AMPC-SL) und Fehlererkennungsmethoden (QuaMo und WENN-DANN-Fehlerregeln)
4. Aufbau einer Fehlermeldekette. Die Realisierung erfolgte durch Nutzung des E-Mail-Systems einer mit der DDC verbundenen GLT zur Weiterleitung ausgewählter Bewertungsergebnisse der Fehlererkennungsmethoden auf dem Demonstratormodul an Smartphones und Büro-PCs vorbestimmter Nutzer. Damit wurde eine Entlastung der Demonstratormodule erreicht, indem diese nur noch die Methodenergebnisse (Fehlerzustände, Zählerwerte, etc.) an die entkoppelnde DDC melden mussten. Die Einrichtung der erforderlichen Konfigurationsparameter, wie Mail-Server-Adressen, Meldeschwellen, Verzögerungszeiten und Empfängerlisten, wurde zentral an einem GLT-Bedienplatz von Kieback&Peter vorgenommen.

Zum anderen wurde eine experimentelle Software-/Hardware-Plattform zur Erfüllung der Demonstratoraufgaben im Bereich Fehlererkennung konzipiert und aufgebaut, die die Mindestanforderungen für die Methoden-Implementierung und-Evaluierung im Projekt erfüllen konnte („Demonstratormodul Fehlererkennung“).

Dabei handelt es sich um einen handelsüblichen Raspberry Pi 3 mit 1GB RAM, 1,4GHz Taktrate, Raspbian-Linux, und ausgestattet mit der Python-Standardbibliothek V2.7, erweitert um Software-Bibliotheken für Datenanalyse, Visualisierung und Kommunikation, wie z.B. Pandas, NumPy, Matplotlib und BACpypes, eingebaut in ein hutschienenfähiges Gehäuse.

Die Kommunikation des Moduls mit der vom Betrieb der realen Anlage entkoppelten DDC der Testumgebung wurde mittels BACnet/IP realisiert.

Abweichend von der zur Reduktion des Datenaufkommens klassisch genutzten, eventbasierten Kommunikation von Signalwerten (Sendung nur nach Werteänderung in einer vorgegebenen Mindesthöhe; COV, Change Of Value) musste dabei jedoch, u. a. zur Nutzung der vom Projektpartner Fraunhofer ISE bereitgestellten QuaMo-Modellroutinen, eine zyklische Messwertabfrage mit fest vorgegebenem Takt realisiert werden.

Randbedingungen dieser Art wurden vor der eigentlichen Implementierung der konkreten Kommunikationsschnittstelle auf dem Demonstratormodul Fehlererkennung im Hinblick auf die QuaMo-Evaluierung gemeinsam mit dem Projektpartner Fraunhofer ISE ermittelt und festgelegt.

Die beschriebene Testumgebung ist in Abbildung 8.2.4-1 dargestellt.

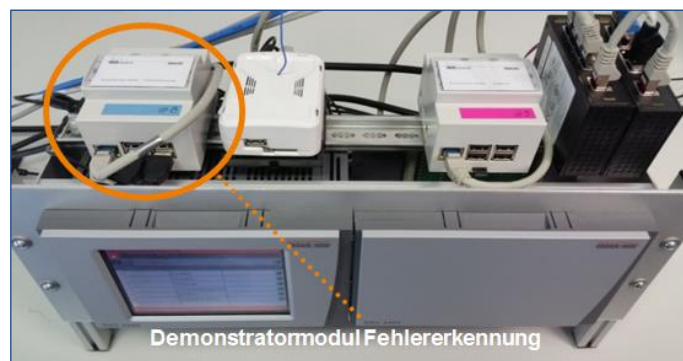


Abbildung 8.2.4-1: Mobile Testumgebung mit entkoppelnder Automationsstation und „Demonstratormodul Fehlererkennung“ inkl. IT-Anbindung

Die Eignung des Integrationskonzeptes konnte sowohl bei der Evaluation der QuaMo-Fehlererkennungsmethode, als auch beim Test der regelbasierten Fehlererkennung (siehe Kapitel 8.2.4.2) im praktischen Einsatz im Rahmen dieses Projektes bestätigt werden.

Darüber hinaus konnte die Testumgebung auch erfolgreich bei der Evaluierung der AMPC-SL-Regelungsstrategie eingesetzt werden (siehe Kapitel 8.2.3.1.1). Das dort genutzte „Demonstratormodul Regelung“, das über die gleiche Software-/Hardware-Basisausstattung wie das „Demonstratormodul Fehlererkennung“ verfügt, ist in Abbildung 8.2.4-1 ebenfalls dargestellt (siehe rosa markiertes Modul).

8.2.4.1.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Die Versuche zur Evaluation der vom Projektpartner Fraunhofer ISE bereitgestellten Fehlererkennungsmethode QuaMo wurden in einem vorausgewählten Heizkreis im Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale durchgeführt.

Gemäß der Festlegung vom Projektpartner Fraunhofer ISE wurden als Eingangsgrößen für die QuaMo-Modellbildung die Außentemperatur, die Vorlauftemperatur und das Ansteuerungssignal des Reglers für das Regelventil des Heizkreises

verwendet. Als Ausgangs- und Zustandsgröße des Modells wurde die Rücklauf-temperatur des Heizkreises ausgewählt.

Sämtliche Versuche wurden in der in Kapitel 8.2.4.1.1 beschriebenen Testumgebung durchgeführt (siehe Abbildung 8.2.4-2).

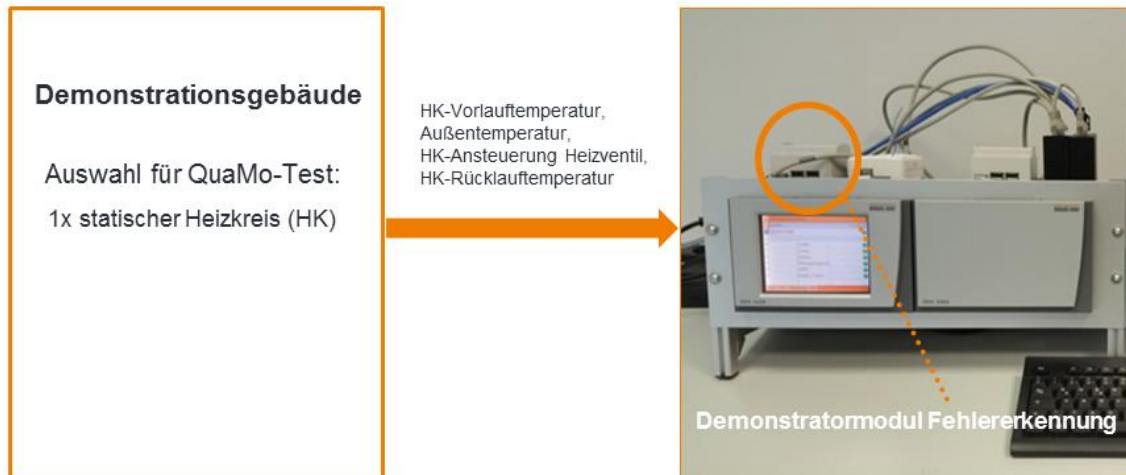


Abbildung 8.2.4-2: Testumgebung für die Evaluation der QuaMo-Fehlererkennungsmethode

Die entsprechenden Messdaten aus dem Demonstrationsgebäude wurden den Projektpartnern von Kieback&Peter während der gesamten Projektlaufzeit zur Nutzung im Projekt zur Verfügung gestellt.

Basierend auf diesen bereitgestellten Messdaten wurden vom Projektpartner Fraunhofer ISE - nach einer sowohl manuell, als auch mit Regelunterstützung automatisiert durchgeführten Datenvorverarbeitung - verschiedene QuaMo-Modelle generiert, und zur Verwendung auf dem Demonstratormodul Fehlererkennung vorkompiliert. Nach Angaben vom Fraunhofer ISE wurde zum Training der Modelle ein Trainingsintervall von etwa 260 Tagen verwendet.

Neben insgesamt sechs vortrainierten QuaMo-Modellen wurde Kieback&Peter vom Projektpartner Fraunhofer ISE auch ein Python-Programmskript zur QuaMo-Offline-Verarbeitung von zuvor in CSV-Dateien abgespeicherten Daten aus der Anlage zur Verfügung gestellt. Damit war es möglich, sowohl die generierten qualitativen Zustandsübergänge der Modell-Ausgabegröße „Rücklauftemperatur“, als auch das mittels der QuaMo-Bewertung errechnete Fehlersignal in geeigneter Form zu visualisieren (siehe z. B. Abbildung 8.2.4-4).

Weiterhin konnten hiermit Einstellungen bezüglich der Bewertungssensitivität vorgenommen werden. Beispiele hierfür sind die Fenstergröße für eine gleitende Mittelwertbildung zur Unterdrückung kurzer Inkonsistenzen im Wahrscheinlichkeits-signal, oder der Grenzwert zur Festlegung, ab welcher Übergangswahrscheinlichkeit eine Klassifikation als Fehler erfolgt. In den Versuchen wurde der Grenzwert auf die Erkennung jedweder Abweichungen vom Trainingsbetrieb eingestellt.

Dieses Programmskript wurde von Kieback&Peter als Grundlage für die Implementierung einer kontinuierlichen, zyklischen Fehlererkennung mittels der QuaMo-Metho-

de im „Live-Betrieb“ des Heizkreises im Demonstrationsgebäude verwendet. Hierzu wurde das Skript um das zyklische Einlesen der erforderlichen Messdatensignale von der DDC der Testumgebung im Minutenraster über BACnet/IP erweitert.

Auf Empfehlung des Projektpartners Fraunhofer ISE wurde die Methodenanwendung auf den Daten, d. h. die Nutzung der zur Verfügung gestellten QuaMo-Routinen, auf die zyklische Abarbeitung in Blockgrößen von 1 Stunde umgestellt.

Die Messdaten und die resultierenden QuaMo-Fehlererkennungsergebnisse (Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten bzw. Fehlersignalwerte in unterschiedlich aufbereiteter Form) sowie parallel mitgeschriebene Debugging-Ausgaben des Programmskriptes wurden während des Evaluierungszeitraumes in Form von Protokoll- und Logdateien kontinuierlich zur Plausibilisierung und zu Diagnosezwecken direkt auf dem Demonstratormodul abgespeichert.

Ferner wurde auch eine Übermittlung der Bewertungsergebnisse in verdichteter Form an die DDC der Testumgebung implementiert. So wurde u.a. auf der DDC ein Parameter zur Erfassung der Anzahl der im aktuellen Stundenspeicher gesammelten „positiven“ booleschen Fehlerindikatoren („Fehlerereignisse“) vorgesehen. Dieser Parameter wurde anschließend sowohl für die Implementierung einer WENN-DANN-Fehlerregel (siehe Regel 1 in Kapitel 8.2.4.2.2), als auch für den Aufbau einer Fehler-Meldeketten genutzt.

Bei der Durchführung von Tests im Rahmen der Inbetriebnahme des Verfahrens in der Testumgebung (Oktober 2017) und der Plausibilisierung der Fehlererkennung (November 2017) konnten zum einen Erkenntnisse im Hinblick auf die anlagen-spezifische Einstellung der Fehlersensitivitätsparameter gewonnen werden. Zum anderen konnten in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Fraunhofer ISE erforderliche Erweiterungsmaßnahmen u. a.

- im Programmskript,
- der Basis-SW-Ausstattung des Demonstratormoduls und
- den QuaMo-Modellroutinen

für die Anwendung im „Echtzeitbetrieb“ in der Anlage ermittelt und noch vor der finalen Evaluierungsphase in der Heizperiode 2017/18 erfolgreich vorgenommen werden. So wurden z. B. vom Fraunhofer ISE nach Absprache aktualisierte Modelle und Algorithmus-Optimierungen bereitgestellt, die dann von Kieback&Peter auf dem Demonstratormodul für die Testanwendung im Demonstrationsgebäude installiert und genutzt werden konnten.

Nachfolgend werden beispielhaft einige Versuchsergebnisse aus dem oben genannten Evaluierungszeitraum gezeigt.

Dabei wurde zur Versuchsdurchführung stets das gleiche QuaMo-Modell („QuaMo_App-Ta1_6x6x6x6x6x6“: 1 Minute Abtastzeit, 6 Partitionen bzw. qualitative Werte je qualitativem Input und qualitativem Output/Zustand) zur Fehlerbewertung eingesetzt, da sich dieses im Hinblick auf die eng bemessenen Speicherressourcen auf dem Demonstratormodul als geeignet erwies.

In **Beispiel 1** wurden die Messdatensignale der Vorlauftemperatur des Heizkreises und der Außentemperatur durch additive Überlagerung eines Fehler-Offsets in Höhe von 10 Kelvin über einen Zeitraum von ca. 20 Minuten künstlich verfälscht bzw. angehoben.

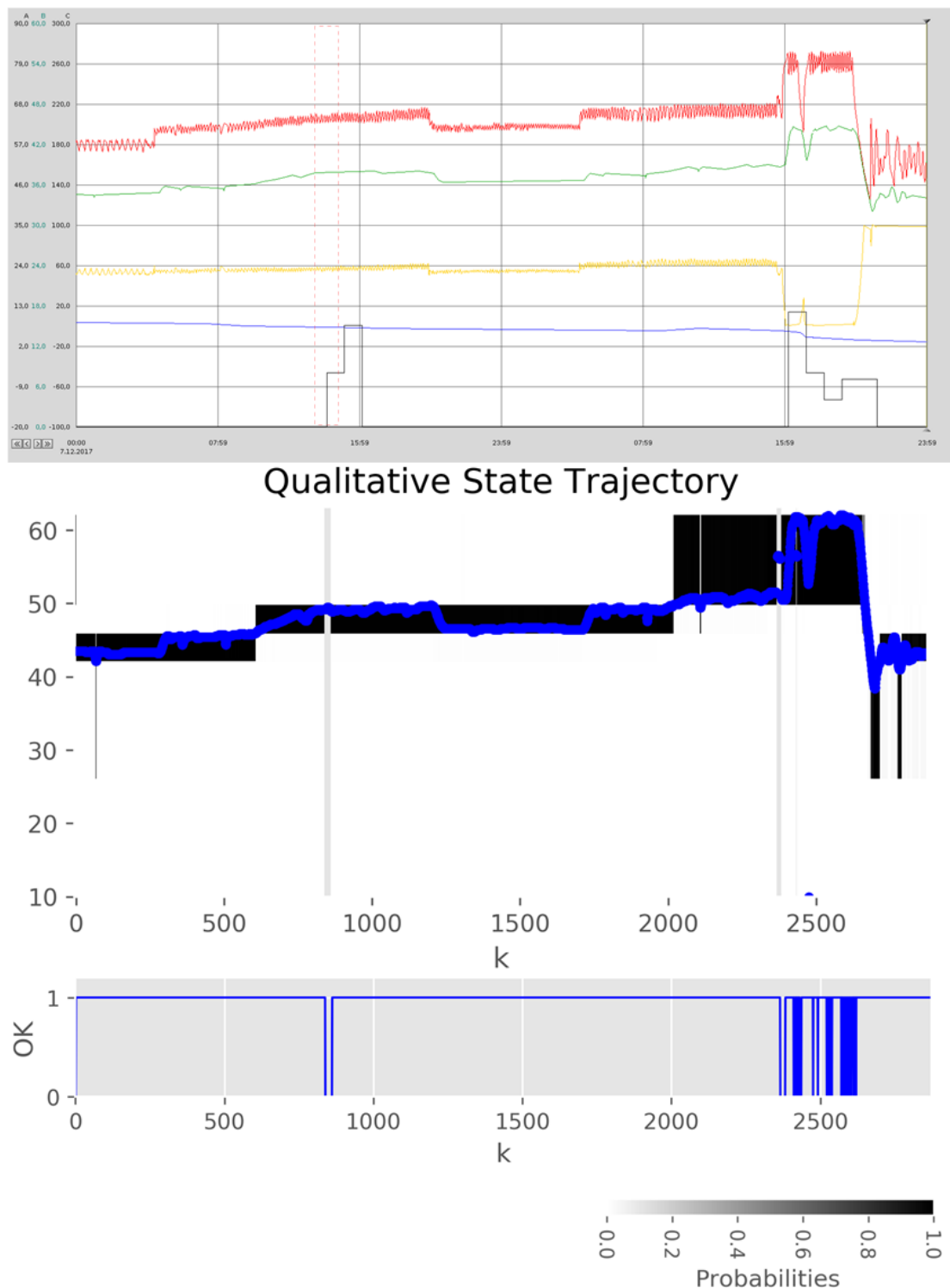


Abbildung 8.2.4-3: Beispiel 1 - Addition von Fehler-Offsets in der Testumgebung

In Abbildung 8.2.4-3 sind im oberen Diagramm die von einer GLT aufgezeichneten, unverfälschten Messdatensignale - Vorlauftemperatur in Rot, Außentemperatur in Blau, Ansteuerung des Regelventils in Gelb und Rücklauftemperatur in Grün - dargestellt. Die beschriebene Fehlerinjektion, die ausschließlich innerhalb der Testumgebung ausgeführt, und daher auch nicht von der GLT aufgezeichnet wurde, erfolgte im rot gestrichelt gekennzeichneten Bereich der Abbildung.

In der Mitte des Diagramms ist die zugehörige qualitative Zustandstrajektorie der Rücklauftemperatur des Heizkreises dargestellt. Darin entsprechen die grauen Skalierungen den Zustandswahrscheinlichkeiten, wobei Schwarz für eine hohe und Weiß für eine geringe Wahrscheinlichkeit steht. Die blauen Punkte stellen die Messwerte der Rücklauftemperatur im ausgewählten Heizkreis dar und entsprechen daher der grünen Kurve im obigen Diagramm. Wie man erkennen kann, wird in der qualitativen Zustandstrajektorie für den Zeitraum der Fehlerinjektion eine niedrige Zustandswahrscheinlichkeit angezeigt, und folgerichtig auch im unteren Diagramm, im dargestellten Fehlersignal, als Fehler markiert.

Parallel zur Erprobung der QuaMo-Methode wurden von November bis Dezember 2017 Untersuchungen zu den Regelstrategien AMPC-SL und EMPC im Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale auch mit Auswirkung auf den von QuaMo überwachten Heizkreis durchgeführt (siehe Kapitel 8.2.3.1 und 8.2.3.3).

Da zum einen bei diesen Tests vielfach Eingriffe in den normalen Betriebsablauf vorgenommen wurden, und vor allem weil das verwendete QuaMo-Modell nicht unter dem Einfluss der genannten Regelungsstrategien trainiert wurde, war die Erwartung in diesem Zeitraum, einen starken Anstieg der Anzahl der QuaMo-Meldungen für Anomalien im überwachten Heizkreis des Demonstrationsgebäudes zu verzeichnen.

Dies ist Gegenstand der Betrachtung in **Beispiel 2**. Wie man in Abbildung 8.2.4-4 erkennen kann, in der die qualitative Zustandstrajektorie der Rücklauftemperatur des überwachten Heizkreises und das zugehörige Fehlersignal für den Monat Dezember 2017 (01.12.-22.12.17) dargestellt sind, wurde von QuaMo in diesem Zeitraum tatsächlich eine Vielzahl von Fehlern gemeldet.

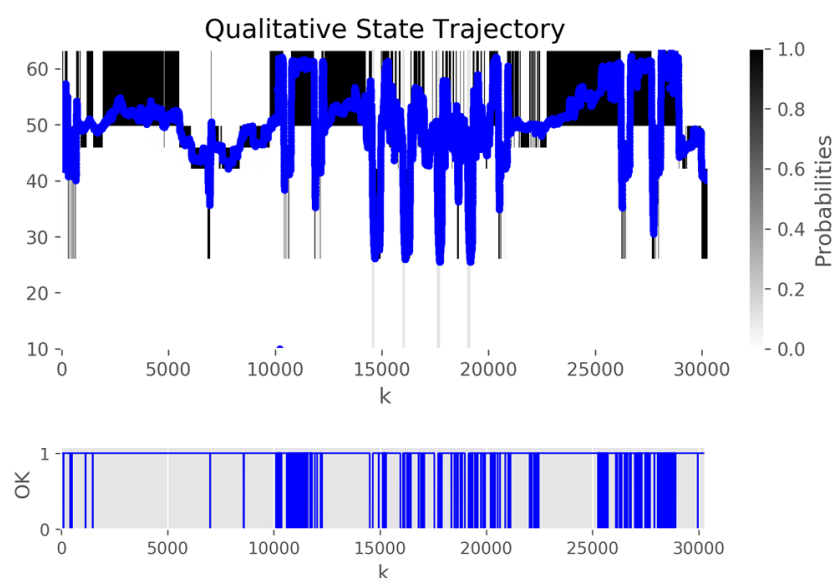


Abbildung 8.2.4-4: Beispiel 2 - QuaMo-Ergebnis während der AMPC-SL- und EMPC-Testphase (Dez-17)

Dies wird auch ohne detaillierte Einzelfehlerbetrachtung deutlich, wenn man sich zusätzlich den Januar 2018 ansieht (siehe Abbildung 8.2.4-5; Darstellungszeitraum: 15.01.-31.01.18). Nach Umschaltung auf die Regelungsstrategie, die auch während der Erzeugung der Trainingsdaten für die QuaMo-Modellbildung aktiv war (Vorlauftemperaturregelung mit Führung nach der Außentemperatur), zeigt sich ein deutlich anderes Fehlersignalbild. Wie man anhand des Fehlersignals in Abbildung 8.2.4-5 ablesen kann, ist die Fehlermelderate gegenüber dem Vormonat deutlich reduziert.

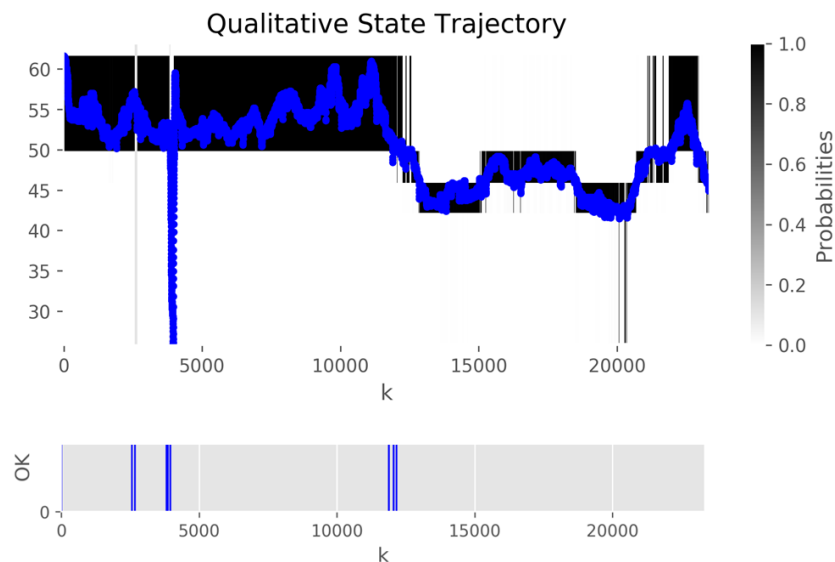


Abbildung 8.2.4-5: Beispiel 2 - QuaMo-Ergebnis nach Rückschaltung der Regelungsstrategie (Jan-18)

In **Beispiel 3** ist das Fehlererkennungsverhalten von QuaMo während der AMPC-SL-Tests detaillierter gezeigt.

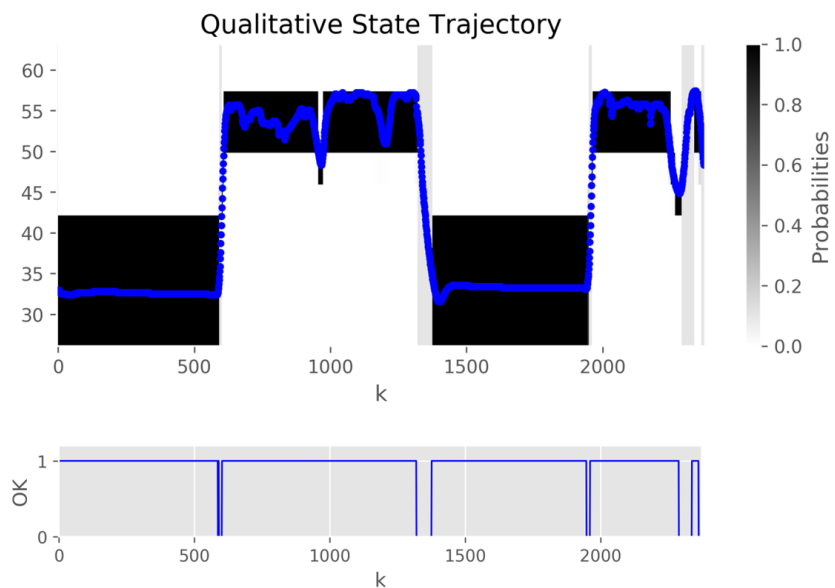


Abbildung 8.2.4-6: Beispiel 3 - QuaMo-Ergebnis während AMPC-SL-Tests (20.11-21.11.17)

Abbildung 8.2.4-6 zeigt anhand von zwei Beispieltagen ein zu diesem Zeitpunkt typisches Verhalten der AMPC-SL-Testversion während der Betriebsartenumschaltung (Nutzzeitwechsel Tag/Nacht). Dabei stellt das Reaktionsverhalten während der Übergangsphasen ein aus QuaMo-Modellsicht fehlerhaftes Verhalten dar (=Abweichung vom Trainingsbetrieb). Dieses Reaktionsverhalten folgt aus den AMPC-SL Sollwertvorgaben für die Vorlauftemperatur.

In den weiteren Beispielen wird das QuaMo-Fehlererkennungsverhalten während verschiedener typischer Störungen des normalen Anlagenbetriebs dargestellt.

Dabei werden in den nachfolgenden Grafiken zur Darstellung der Messdatensignale in der GLT-Aufzeichnung die folgenden Signalfarben verwendet:

- Rot: Vorlauftemperatur
- Grün: Rücklauftemperatur
- Blau: Außentemperatur
- Gelb: Ansteuerung Heizventil
- Schwarz: Fehlerbewertungsergebnis („Fehlerzähler“)

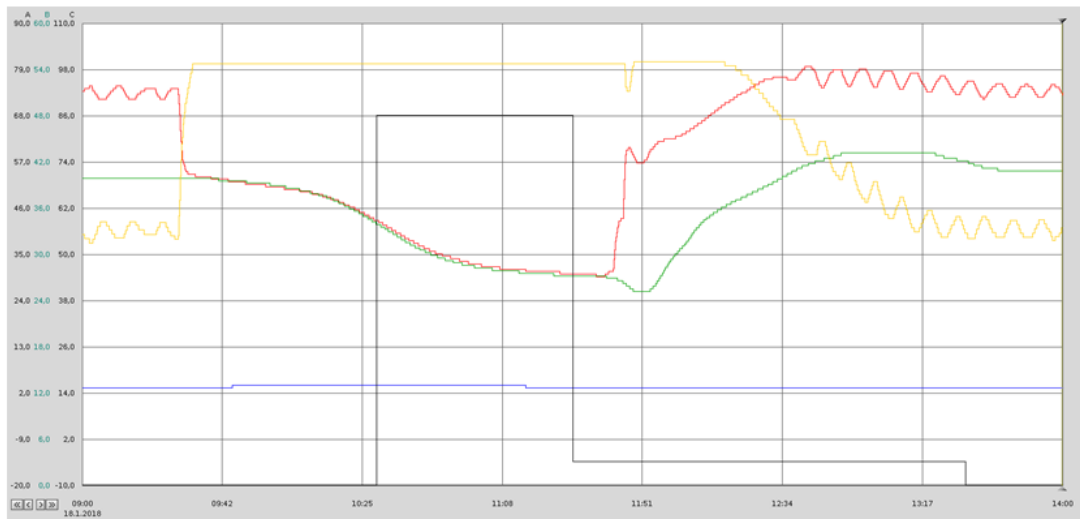
Das im Stundenraster errechnete Fehlerbewertungsergebnis zeigt die Anzahl der jeweils in der Stunde vor dem Berechnungszeitpunkt von der QuaMo-Methode im Minutenraster gesammelten Einzelfehlerergebnisse ($\Rightarrow$ Wertebereich: [0,60]).

Ursache der Betriebsstörung in **Beispiel 4** war eine Öllieferung für die Kesselanlage im Demonstrationsgebäude. Hierzu wurde am betreffenden Tag die Kesselanlage für ca. 1 Stunde außer Betrieb genommen. Dies hat u. a. ein Absinken von Vorlauf- und Rücklauftemperatur und eine entsprechende Unterversorgung des überwachten Heizkreises zur Folge (siehe Abbildung 8.2.4-7).

Wie man am hellgrauen Bereich in Abbildung 8.2.4-7 erkennen kann, werden die Betriebsstörung bzw. die unwahrscheinlichen Zustände im QuaMo-Fehlersignal korrekt als Auffälligkeit markiert. Auch der in Abbildung 8.2.4-7 dargestellte Fehlerzähler zeigt, gemäß Berechnungszeitpunkt zeitverzögert, 48 Fehlerereignisse für den Zeitraum der Abschaltung an. Nach Erreichen des selben Anlagenzustandes wie vor der Abschaltung wechselt der Fehlerzählerwert wieder auf 0, d. h. es wurden in der dem Updatezeitpunkt vorangegangenen Stunde keine Fehlerereignisse mehr erkannt.

In **Beispiel 5** wurde in der Heizungsanlage im Demonstrationsgebäude Wasser nachgefüllt. Die Vorlauftemperatur des überwachten Heizkreises fällt hier kurzzeitig um ca. 20 Kelvin ab, wird dann aber von der Regelung schnell wieder auf das Temperaturniveau vor der Betriebsstörung ausgeregelt (siehe Abbildung 8.2.4-8). Im zeitlichen Zusammenhang mit dem Einbruch der Vorlauftemperatur trat ein kurzzeitiger Ausfall der Datenaufzeichnung auf. Ob ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Effekten besteht, konnte im Rahmen des Projektes noch nicht geklärt werden.

Auch in Beispiel 5 zeigt das von QuaMo bestimmte Fehlersignal erneut korrekt den unwahrscheinlichen Zustandswechsel verursacht durch die beschriebene Betriebsstörung an.



Qualitative State Trajectory

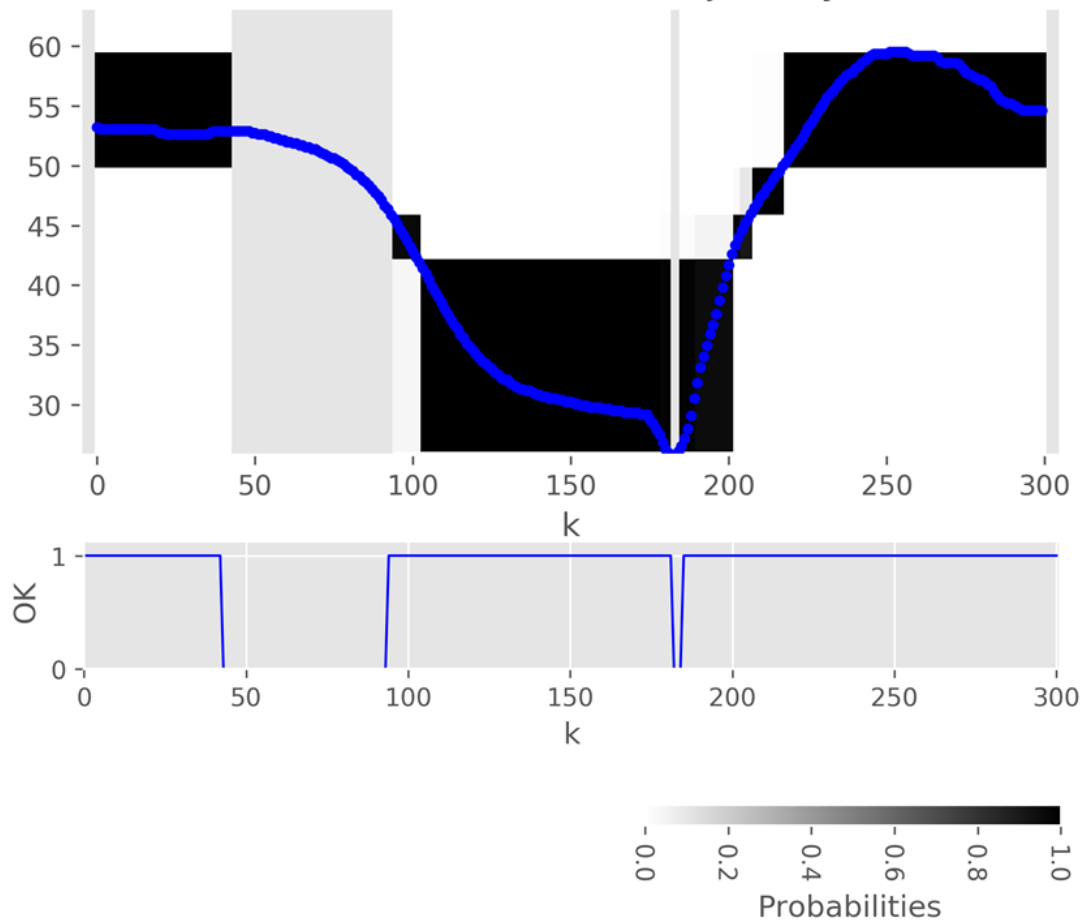
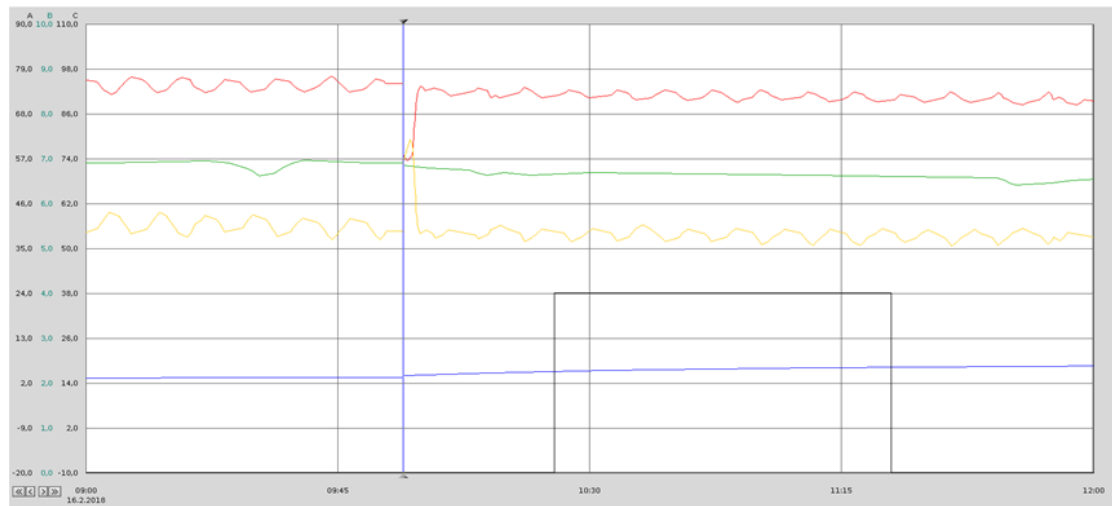


Abbildung 8.2.4-7: Beispiel 4 – Betriebsstörung wegen Öllieferung (18.01.18, ca. 09:30 – 10:30 Uhr).

Der in Abbildung 8.2.4-8 dargestellte Fehlerzähler registriert im relevanten Zeitraum 4 Fehlerereignisse ($\Rightarrow$ Zeitdauer der Störung ca. 4 Minuten) und fällt zum nächsten Berechnungszeitpunkt, bei dem die Ausgangslage im Heizkreis wiederhergestellt war, korrekt wieder auf 0 zurück.



Qualitative State Trajectory

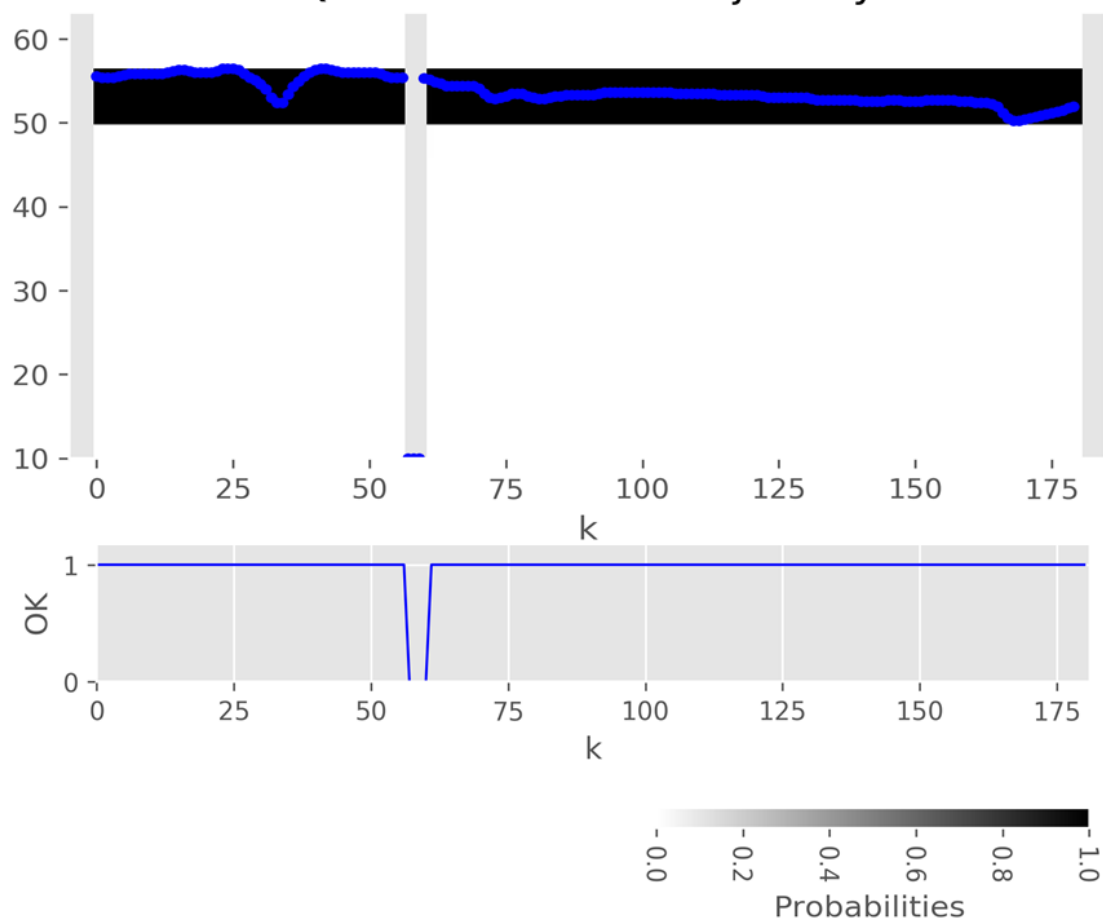


Abbildung 8.2.4-8: Beispiel 5 - Durchführung von Wartungsarbeiten (Wasser nachfüllen am 16.02.18)

Beispiel 6 zeigt das Bewertungsverhalten der QuaMo-Fehlererkennungsmethode nach einer deutlichen manuellen Anhebung des Erfahrungswertes für die Begrenzung der Kesselthermostate beider Kessel der Anlage durch das Betriebspersonal auf Grund anhaltender niedriger Außentemperaturen. Durch die Anhebung wurde zwar auch die Vorlauftemperatur im ausgewählten Heizkreis gegenüber vorher im Mittel um ca. 5 Kelvin erhöht. Wie man jedoch an der Ansteuerung des Regelventils mit dauerhaft 100% entnehmen kann, liegt während des gesamten Betrachtungs-

zeitraumes in Abbildung 8.2.4-9 dennoch eine Unterversorgung des Heizkreises vor. Bis auf die beobachtbaren Signalschwingungen verbleiben in der Folge Vorlauf- und Rücklaufftemperatur auf konstanten Niveaus - trotz 100% Regelventilansteuerung bei dauerhaft niedrigen Außentemperaturen.

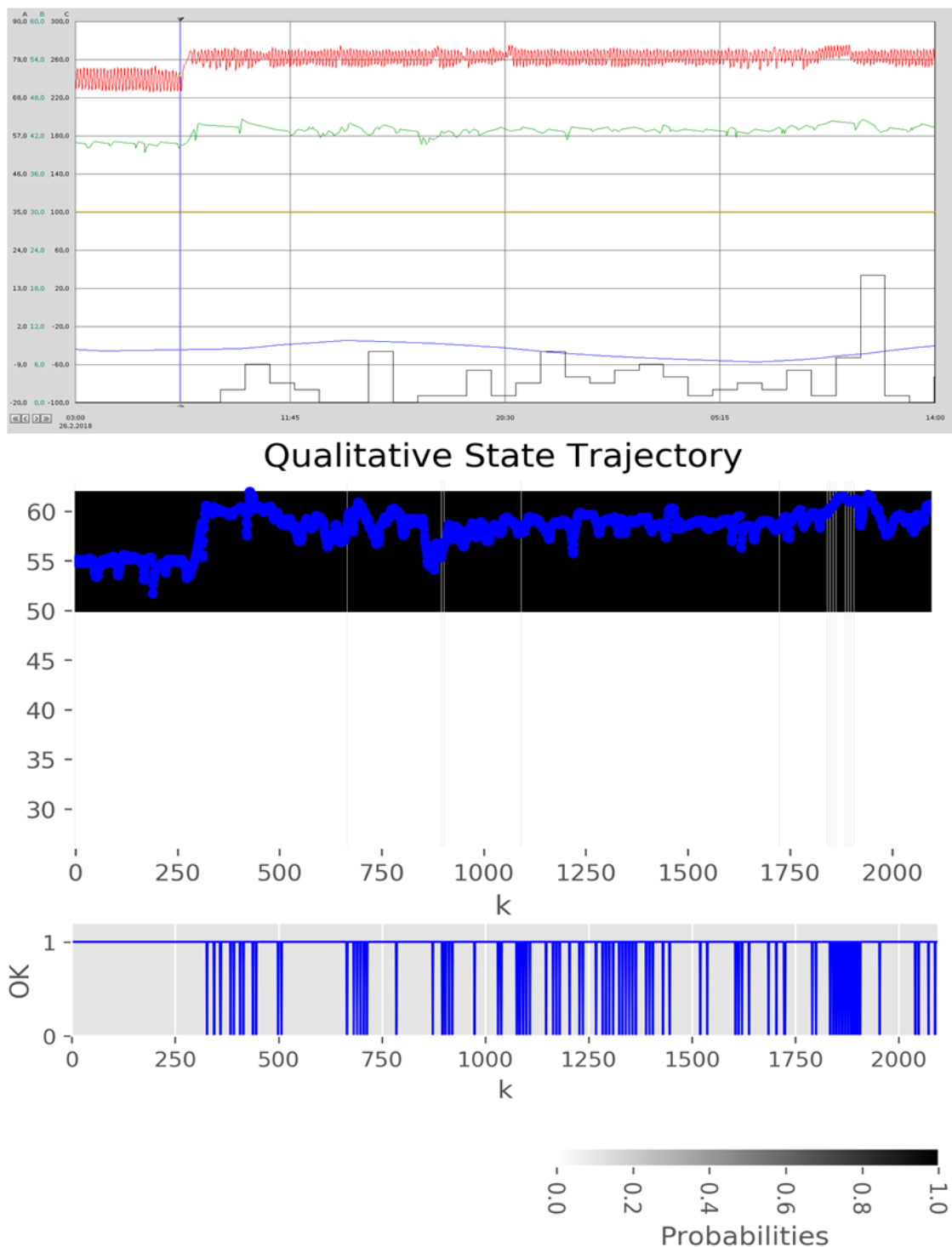


Abbildung 8.2.4-9: Beispiel 6 – Heizkreisunterversorgung trotz Anhebung d. Kesselthermostatbegrenzung

Die Reaktion der QuaMo-Fehlerbewertung fällt relativ heftig aus, und ist ebenfalls in Abbildung 8.2.4-9 dargestellt. Auch im Fehlerzähler zeigen sich nach der Anhebung

immer wieder Fehlerereignisse. Der Maximalwert liegt im Betrachtungszeitraum bei 20 von 60 möglichen Fehlerereignissen.

Wie man den obigen Beispielen entnehmen kann, gelingt es mit der QuaMo-Methode Auffälligkeiten, selbst kurzzeitige Betriebsstörungen im einstelligen Minutenbereich, zu identifizieren, die sich im Besonderen in einer geänderten Systemdynamik manifestieren. Erkannt und gemeldet werden Zustandsübergänge, die dem zuvor anhand von Messdaten angelernten Systemverhalten nicht entsprechen.

Der Beobachtung nach könnte möglicherweise auch nach einem korrekt als Auffälligkeit gemeldeten Zustandswechsel der Verbleib in dem neuen Zustand auf Grund der Dynamik der konstituierenden Signale im Hinblick auf das antrainierte Verhalten von der Methode als plausibel bewertet werden. Ein erreichter Fehler- bzw. unerwünschter Betriebszustand würde dann nicht weiter als Anomalie erkannt, und folglich auch nicht weiter gemeldet werden.

Zur kontinuierlichen Erfassung und Meldung statischer Fehlerzustände ist es daher ratsam, ergänzende Methoden zu verwenden, wie z. B. regelbasierte Fehlererkennungsverfahren (siehe Kapitel 8.2.4.2).

8.2.4.2 Regelbasierte Fehlererkennung

Mit der Eigenimplementierung und dem Aufbau der Infrastruktur für ein regelbasiertes Fehlererkennungssystem, wie in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben, hat Kieback&Peter zum einen das Ziel verfolgt, eine flexibel einsetzbare Plattform zur Integration und Evaluierung von Fehlerregeln im Gebäudeautomationssystem eines der Berliner Demonstrationsgebäude zu realisieren. Hiermit sollten Umsetzungserfahrungen zur Auswertung im Projekt gesammelt, und Fehlerhinweise der Projektpartner gezielt mit der Unterstützung von Fehlerregeln überprüft werden können.

Zum anderen sollte damit eine Möglichkeit geschaffen werden, ggf. von den Projektpartnern bereitgestellte Fehlererkennungsregeln für einen Test im realen Anlagenbetrieb einfach übernehmen, und eigene Ideen und Umsetzungsvorschläge schnell realisieren und erproben zu können.

Weiterhin sollte damit erreicht werden, die Eignung der QuaMo-Methode des Projektpartners Fraunhofer ISE zur Fehlererkennung (siehe Kapitel 8.2.4.1) in Kombination mit Grenzwertregeln weiterführend untersuchen zu können.

8.2.4.2.1 Testumgebung und Implementierung

Die Details zum Aufbau der von Kieback&Peter für die Lösung der Demonstratoraufgaben im Projekt eingerichteten Testumgebung, wie z. B. zur Realisierung des „Demonstratormoduls Fehlererkennung“, von dem eine Nutzungsvariante in Abbildung 8.2.4-10 gezeigt ist, wurden bereits in Kapitel 8.2.4.1.1 ausführlich beschrieben und werden daher an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

Zur Überwachung von spezifischen Betriebszuständen, die von den Projektpartnern „Plenum Ingenieurgesellschaft“ und „Fraunhofer ISE“ zur weiteren Untersuchung im Projekt adressiert wurden (siehe hierzu auch die Beschreibungen zu den Arbeitspaketen AP B.3 und AP B.5), wurde von Kieback&Peter ein Realisierungskonzept für ein regelbasiertes System mit einem einfachen Web-UI zur Umsetzung auf dem

„Demonstratormodul Fehlererkennung“ entworfen und implementiert. Damit konnten umfangreiche Erfahrungen insbesondere im Hinblick auf eine geeignete Visualisierung und eine angemessene Meldehäufigkeit der Fehlerbewertungen gewonnen werden, zusätzlich wurde die Akzeptanz des Meldesystems durch verschiedenen Nutzer getestet.



Abbildung 8.2.4-10: Demonstratormodul Fehlererkennung – Nutzungsvariante “Minischaltschrank”

Eine Auswahl von Ergebnissen, die mit dem regelbasierten Fehlererkennungssystem im praktischen Einsatz erzielt werden konnten, ist in Kapitel 8.2.4.2.3 dargestellt.

Orientiert an der Software-Ausstattung des Demonstratormoduls wurde die Implementierung des regelbasierten Systems in der Programmiersprache „Python“ unter Nutzung der installierten Modul-Bibliotheken zur Analyse, Visualisierung und Kommunikation der Daten vorgenommen (siehe hierzu Kapitel 8.2.4.1.1).

Alle aus dem Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale zur Berechnung der Fehlerregeln auf dem Demonstratormodul benötigten Messdatensignale wurden auf der DDC der Testumgebung bereitgestellt.

Die exemplarisch auf dem Demonstratormodul „Fehlererkennung“ implementierten WENN-DANN-Fehlerregeln sind in Kapitel 8.2.4.2.2 im Detail beschrieben.

Die Präsentation der Ergebnisse der Fehlerregeln wurde in Form von Diagrammdarstellungen auf HTML-Webseiten realisiert. Der Webseitenzugriff wurde dabei unterschiedlichen Nutzern im hausinternen Netz ermöglicht. Der Webseitenaufbau wurde bewusst einfach gestaltet. Als Webserver-Lösung wurde „lighttpd“ verwendet.

Nachfolgend sind die wichtigsten Anzeigeelemente und die Arbeitsweise der implementierten Web-UI-Lösung beschrieben. Das Ergebnis der Berechnung einer Fehlerregel wird u. a. in Form einer Ampel dargestellt (siehe Abbildung 8.2.4-11).

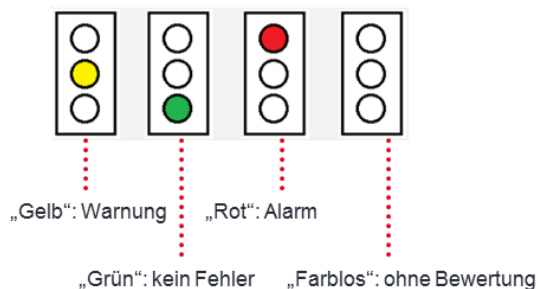


Abbildung 8.2.4-11: Signalisierung von Fehlerzuständen mit Ampelsymbolen

Abbildung 8.2.4-12 zeigt die Übersichtsseite der Anwendung kurz nach dem Start des regelbasierten Systems

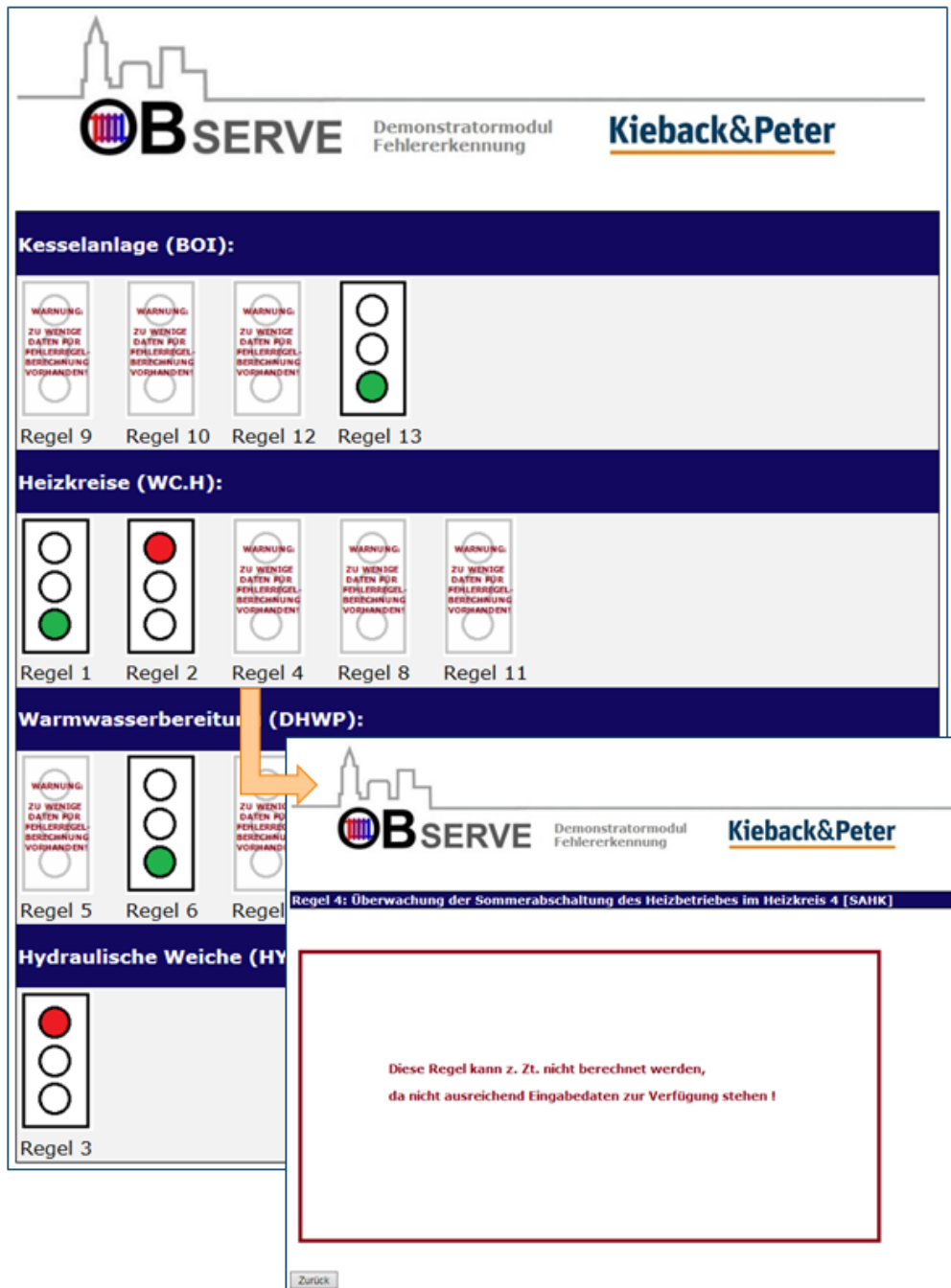


Abbildung 8.2.4-12: Ergebnisübersicht und Detaillierungsbeispiel nach Programmstart

Je nach Regel bzw. Regelkonfiguration sind für die Fehlerbewertung unterschiedliche Mindestdatenmengen erforderlich. Nach dem Programmstart zeigen daher ggf. einige Ampeln den Warnhinweis „Zu wenige Daten für Regelberechnung vorhanden“ an. Wird ein solches Ampelsymbol angeklickt, gelangt man auf die Detailseite der Regel, auf der dann ebenfalls ein entsprechender Warnhinweis zu finden ist (siehe Abbildung 8.2.4-12).

Die Reihenfolge der Regelnummerierung ist von untergeordneter Bedeutung. Die Zuordnung der Fehlerregeln zu Anwendungskategorien dient dagegen der Übersichtlichkeit für den Nutzer und ist somit ein wesentlicher Bestandteil der Webseite.

Sobald die jeweils benötigte Mindestdatenmenge verfügbar ist, kann durch einen Mausklick auf ein Ampelsymbol die Detailsicht einer Regel in einer eigenen Webseite aufgerufen werden (siehe Abbildung 8.2.4-13).

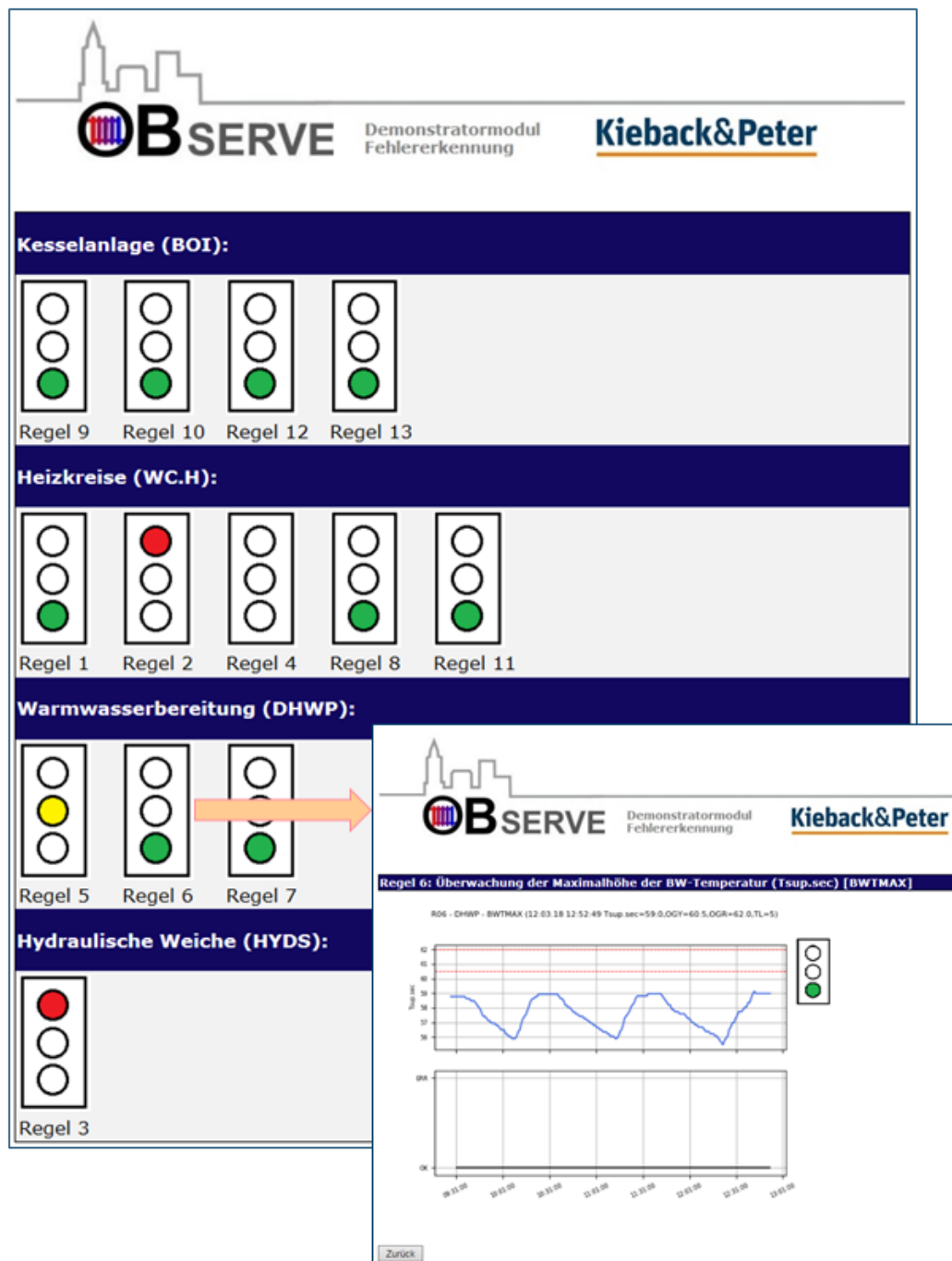


Abbildung 8.2.4-13: Ergebnisübersicht und Detaillierungsbeispiel in der Betriebsphase

Dort werden alle wesentlichen Details zur Fehlerregel in einer Diagrammdarstellung visualisiert. Hierzu zählen neben der Anzeige der für jede Regel spezifisch, fest zugeordneten Messdatensignale (Kurzfristtrend der letzten Stunde<n>; Zeitdauer konfigurierbar) auch die zur Regelberechnung verwendeten wichtigsten Grenzwerte, sowie der zuletzt berechnete Zustandswert der Regel als Ampelsymbol neben dem Diagramm (siehe Abbildung 8.2.4-14).

Erfolgt die Bestimmung des Regelergebnisses auf Basis einer aus den Messdaten errechneten Zwischengröße, so wird diese „Bewertungsgröße“ in der zweiten Diagrammzeile von unten ebenfalls dargestellt (siehe Abbildung 8.2.4-14). Die Anzeige des Regelberechnungsergebnisses (Fehlerringal „ERR“) erfolgt jeweils in der untersten Diagrammzeile.

Die Regelbezeichnung und die Regelnummer sowie eine regelspezifische Kennung sind im Header der Webseite zu finden.

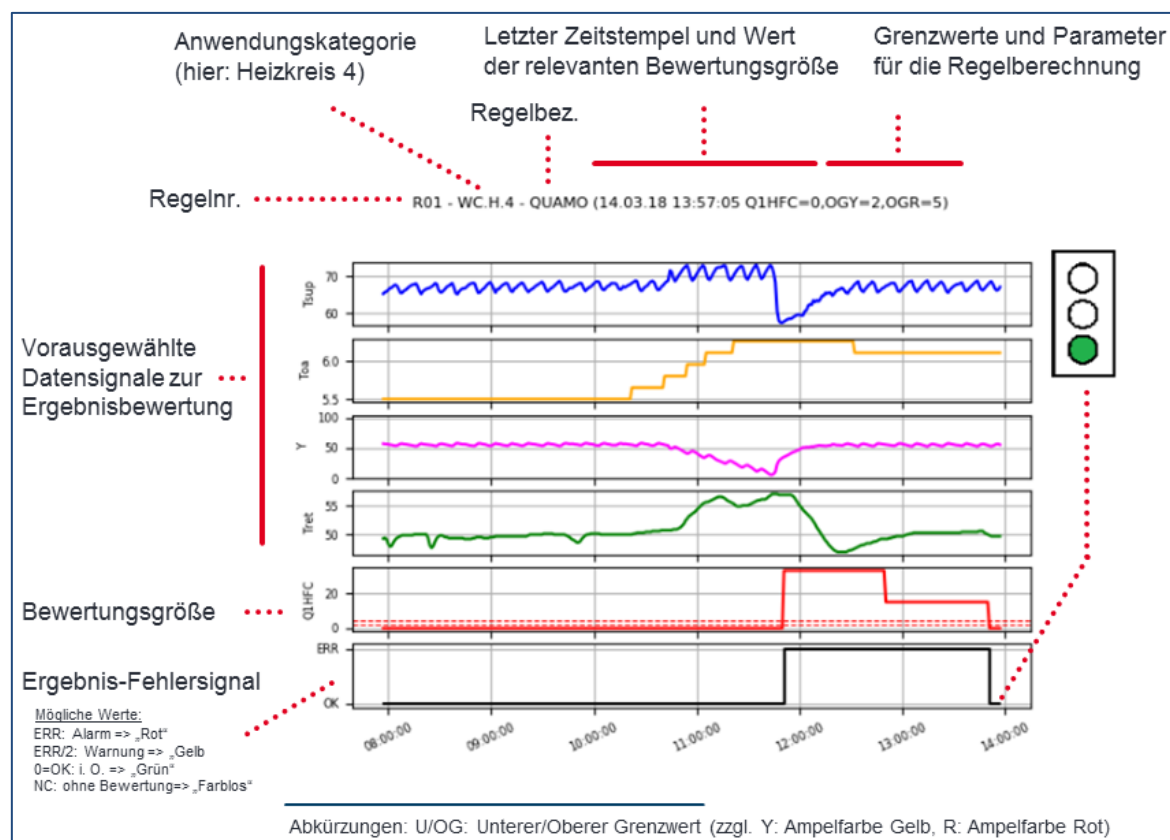


Abbildung 8.2.4-14: Ergebnisvisualisierung der Regeln in Form von Diagrammen

Wird die gleiche Regel auf mehrere Subsysteme in der betrachteten Anlage angewendet, z. B. mehrere Heizkreise oder mehrere Kessel, so werden die resultierenden Ergebnisdiagramme mit den jeweiligen Einzelbewertungen nacheinander auf der Detailseite der Regel dargestellt. Auf der übergeordneten Übersichtsseite wird dann als aggregiertes Gesamtergebnis das jeweils kritischste Einzelbewertungsergebnis als Ampelsymbol angezeigt.

Kann trotz ausreichend vorhandener Eingangsdatenmenge eine Regel auf Grund unerfüllter Regelvorbedingungen nicht berechnet werden, so wird dies im Diagramm in Form einer „farbloren Ampel“ kenntlich gemacht. So erfolgt beispielsweise die Berechnung der in Kapitel 8.2.4.2.2 beschriebenen Regel zur Überwachung der Sommerabschaltung des Heizbetriebes in einem Heizkreis nicht vor Überschreiten vorkonfigurierter Grenzwerte der Außentemperatur. Dies kann im Beispiel in der Abbildung 8.2.4-15 gesehen werden: Die Außentemperatur T_{0a} in der obersten Diagrammzeile überschreitet nie den konfigurierten „Tag-Grenzwert“ von 20 °C; $\Rightarrow \text{ERR}=\text{NC}$.

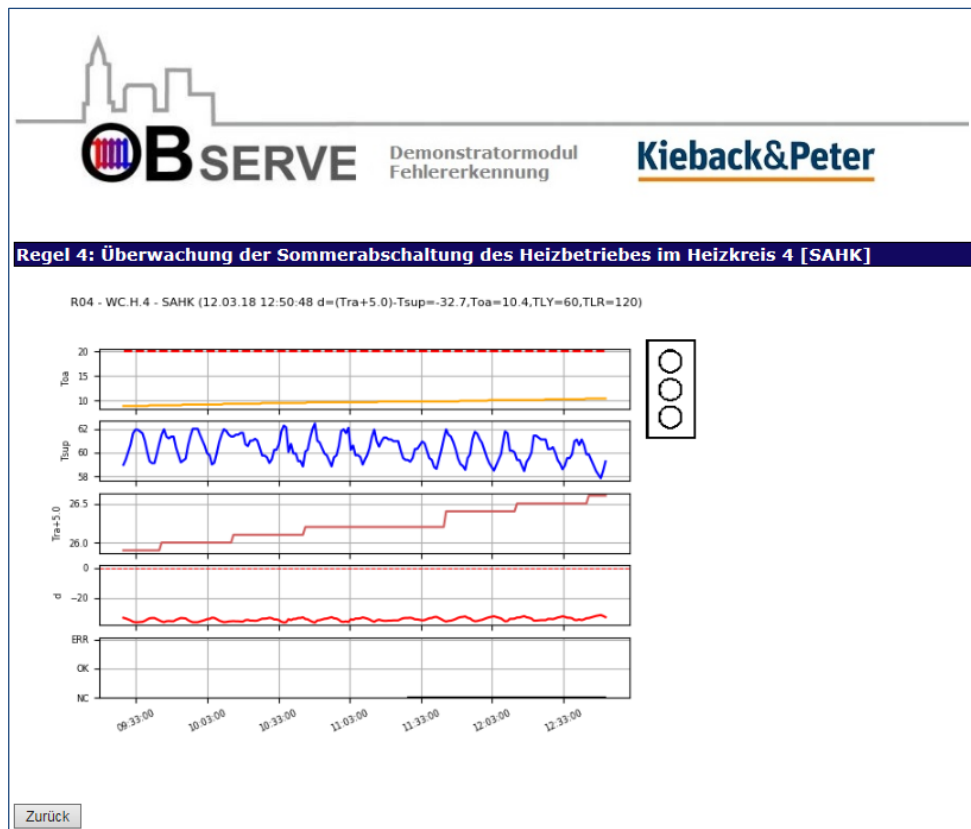


Abbildung 8.2.4-15: Beispiel für das Fehlerregelergebnis „ohne Bewertung“

Die Einstellung der bei den Fehlerregelberechnungen zur Anwendung kommenden Grenzwerte sowie weiterer regelspezifischer Parameter, wie z. B. der Stundenreichweite des im Diagramm angezeigten Trends, wurde über eine Konfigurationsdatei implementiert. Ein Beispielauszug aus einer Konfigurationsdatei ist in Abbildung 8.2.4-16 gezeigt.

```
rule-1:
  rdescr0 : Quamo HK4
  ractive : True
  rvdebug : False
  rvploth : 6
  rupdate : 0
  rparcnt : 2
  rparam0 : 5
  rparam1 : "rule1_0.png"
rule-2:
  * * *
```

Abbildung 8.2.4-16: Auszug aus der Konfigurationsdatei der Fehlerregeln

Hierüber wurde es auch ermöglicht, die Berechnung einzelner Regeln gezielt ab- und zuzuschalten (Parameter *ractive* in Abbildung 8.2.4-16), den Berechnungszeitpunkt einer Fehlerregel zu verlegen (*update*), sowie die Anzeige von regelspezifischen Zusatzinformationen zum Debugging in der Diagrammanzeige freizuschalten (*rvdebug*). Ein Beispiel hierzu ist in Abbildung 8.2.4-17 dargestellt.

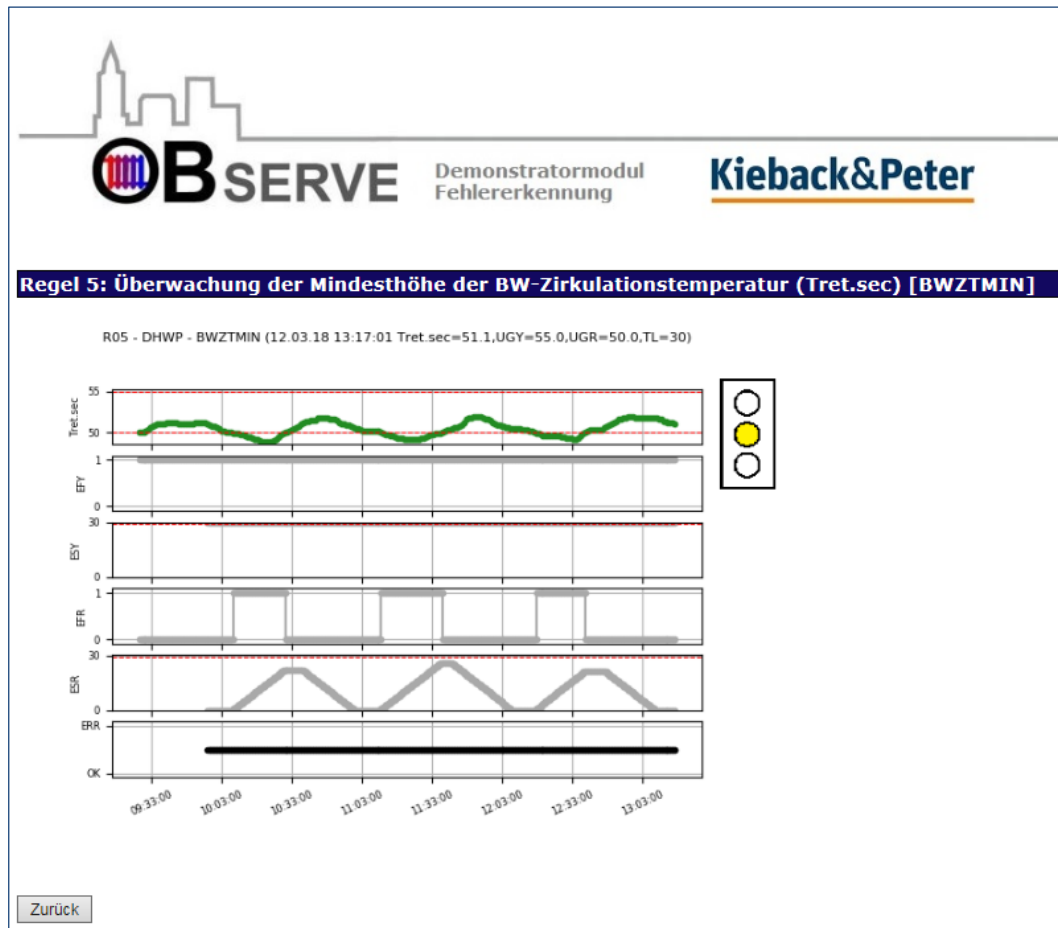


Abbildung 8.2.4-17: Beispiel für Diagrammanzeige mit aktivierten Debugging-Ausgaben

So kann man im Beispiel in Abbildung 8.2.4-17 anhand der zusätzlich dargestellten Informationen gut erkennen, dass die Bewertungsgröße der Regel (die Messdaten in der obersten Diagrammzeile) zwar dauerhaft den ersten Grenzwert in Höhe von 55 °C (UGY) unterschreitet, was zur Anzeige des Warnzustandes („gelbe Ampel“) führt, jedoch den eingestellten zweiten Grenzwert in Höhe von 50 °C (UGR) nie kontinuierlich für 30 Minuten lang unterschreitet (TL=30), was zur Anzeige des Alarmzustandes („rote Ampel“) geführt hätte.

Die im letzten Beispiel angedeutete Art der Umschaltung zwischen den Bewertungszuständen wurde bei der Implementierung der Regeln im Allgemeinen verwendet. Zum Wechsel in einen negativeren Bewertungszustand muss der Fehler nacheinander ggf. mehrfach vorliegen (Konfigurationsparameter TL). Eine Rückschaltung in einen positiveren Bewertungszustand erfolgt dagegen sofort. Je nach Wahl des Konfigurationsparameters TL kann damit eine Abschwächung der Meldehäufigkeit negativer Bewertungszustände vorgenommen werden.

Die zyklische Abfrage sämtlicher zur Berechnung der Regeln benötigter Messdaten von der DDC4200e der Testumgebung wurde über BACnet/IP im Minutenraster realisiert.

Jeweils unmittelbar nach einem Datenempfang von der DDC werden die Daten auf dem Demonstratormodul in einem Datencontainer (HDF5) persistiert, um für die Berechnung und Trendanzeige (Datenhistorie) der Regeln zur Verfügung zu stehen.

Um die Rechenlast auf dem Demonstratormodul in den 1-Minuten-Zeitschritten gering zu halten, wurde die Bearbeitung der Regeln in Regelgruppen vorgenommen. Zur Verteilung der Berechnungszeitpunkte der Regeln wurde ein 5-Minuten-Zeitfenster gewählt. Dieses Zeitfenster orientiert sich an den Abfragezeitpunkten und der vorgesehenen Regelanzahl.

Abbildung 8.2.4-18 verdeutlicht das beschriebene Vorgehen anhand der in Kapitel 8.2.4.2.2 vorgestellten und auf dem Modul von Kieback&Peter implementierten 13 Demonstratorregeln. Wie man erkennen kann, wird z. B. Regel 1 in der ersten Minute des Zeitfensters berechnet. Die Berechnung von Regel 2 erfolgt dagegen erst eine Minute später. Dieser Vorgang wiederholt sich in Abständen von 5 Minuten ($\Rightarrow$ Regel-Update alle 5 Minuten).

Die Zuordnung einer Regel zu einer der fünf Regelgruppen wurde als Einstellparameter in der Konfigurationsdatei implementiert (siehe Abbildung 8.2.4-16, Parameter `rupdate`).

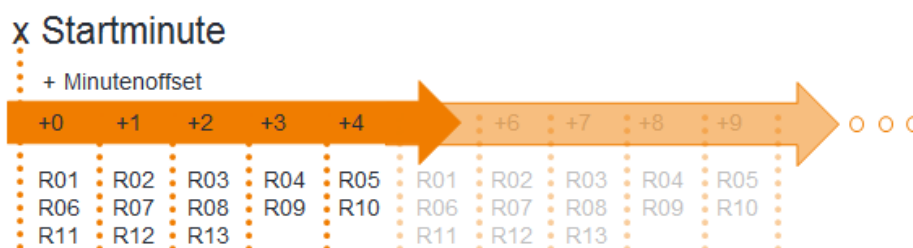


Abbildung 8.2.4-18: Zeitpunkte der Regelberechnung im Beispielsystem

Bei Verwendung der Einstellwerte aus der Standard-Konfigurationsdatei (siehe hierzu Abbildung 8.2.4-21) ergibt sich auf Grund der daraus resultierenden Mindestdatenmengen für die Berechnung die in Abbildung 8.2.4-19 dargestellten frühestmöglichen Ergebnisbereitstellungszeitpunkte je Regel.

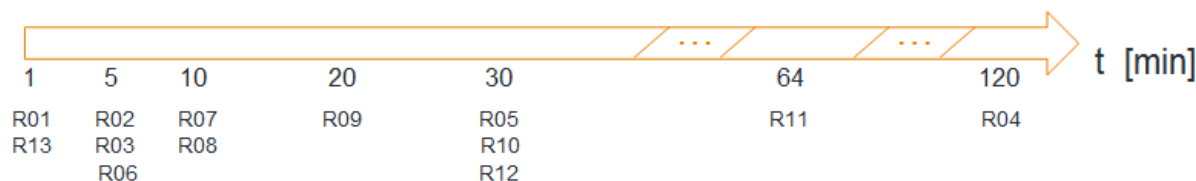


Abbildung 8.2.4-19: Erstmalige Ergebnisbereitstellung der Demonstratorregeln nach Systemstart

Zum Abschluss eines Berechnungszyklus werden die Ergebnisse der Fehlerregeln über BACnet/IP auf die DDC zurückgespielt, um z.B. bei Vorliegen eines Alarms über die installierte Fehlermeldekette (siehe Kapitel 8.2.4.1.1) via E-Mail über den aktualisierten Zustand informiert zu werden.

Abbildung 8.2.4-20 fasst die zuvor beschriebenen Bearbeitungsschritte, die innerhalb der Zeitspanne eines Berechnungszyklus – d. h. in der vorliegenden Konfiguration innerhalb von einer Minute - in der Implementierung auf dem Demonstratormodul abgearbeitet werden, noch einmal zusammen.

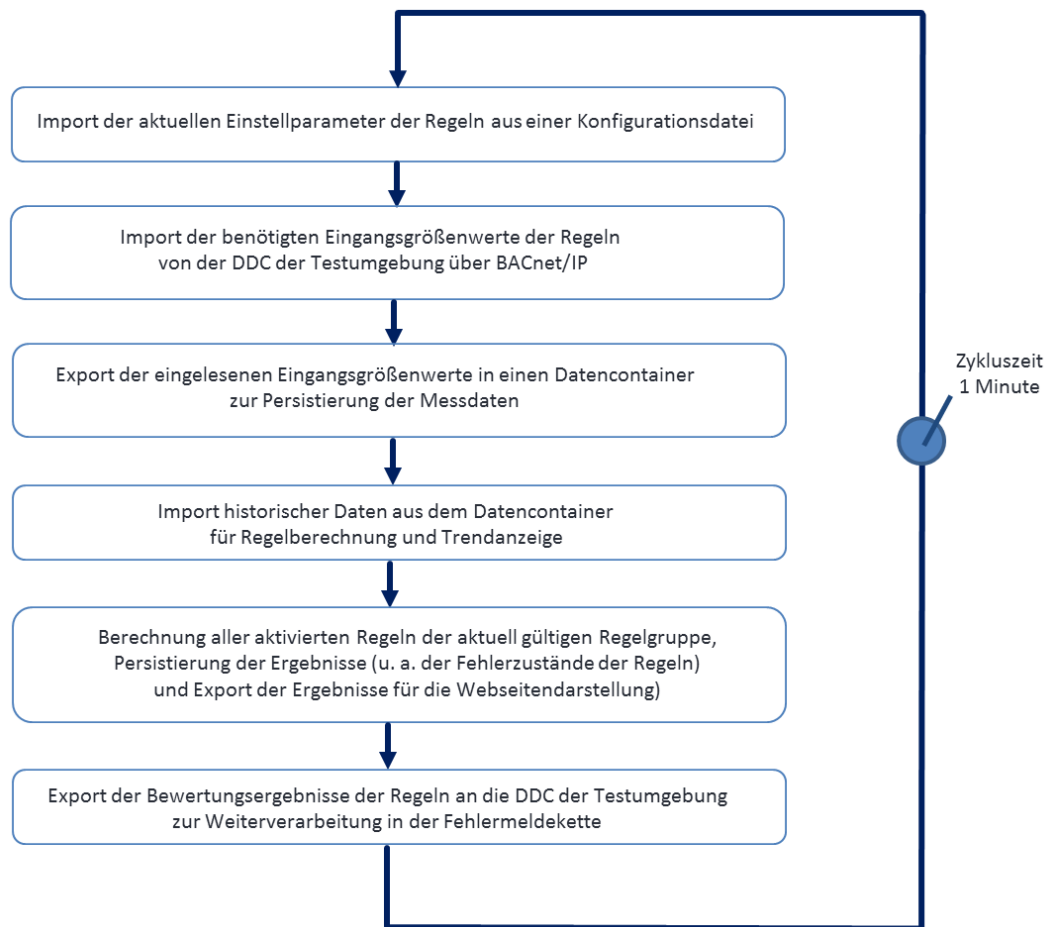


Abbildung 8.2.4-20: Hauptabarbeitungsschritte der Implementierung innerhalb eines Berechnungszyklus

8.2.4.2.2 Beschreibung der Regeln

In diesem Kapitel werden die von Kieback&Peter auf dem „Demonstratormodul Fehlererkennung“ implementierten WENN-DANN-Fehlerregeln beschrieben.

Der Entwurf und die Auswahl der Regeln wurde dabei von Kieback&Peter aufbauend auf den im Rahmen von Projekttreffen und Diskussionen mit den Projektpartnern gewonnenen Erkenntnissen und orientiert an den installierten Subsystemen im Demonstrationsgebäude vorgenommen.

Eine tabellarische Gesamtübersicht über die implementierten Regeln ist in Abbildung 8.2.4-21 dargestellt.

RNo -Kat	Bezeichnung	Bewertungsgröße	Fehlerkriterium	#P	Trw	P1	P2	P3	P4	TL	Anmerkungen	E
R01 – WC.H	Überwachung eines Heizkreises mit vortrainierten Qualitativen Modellen nach Fraunhofer ISE	Q1HFC	Fehlersumme im Block (Q1HFC) überschreitet vorgeg. Toleranzwerte (UGR=P1, OGY=OGR/2)	2	6h	5					Blockgröße: 60x 1 min. => Änderung von Q1HFC im Stundenraster	
R02 – WC.H	Überwachung der Vorlauf- / Rücklauftemperaturspitzung in Heizkreisen	dT=Tsup-Tret	dT unterschreitet mehrmals (TL) nacheinander vorgeg. Grenzwerte (UGDTR=P3, UGDY=P2)	11	1h	55 °C	17.5 K	15 K		5	Zusatzbed. f. Regelberechnung: Vorlauftemperatur>P1 (UGNC), Ansteuerung Heizventil>0% u. Volumenstrom>0 m³/h, sonst Ausgabe „ohne Bew.“	
R03 – HYDS	Überwachung auf primäre Kurzschlussströmung in der hydraulischen Weiche	SDIFF1_2 =SUM1-SUM2, SUM1=Tsp+Trs, SUM2=Tss+Trp	SDIFF1_2 unterschreitet mehrmals nacheinander (>TLR=TL-1, >TLY=TLR/2) den vorgeg. Grenzwert (UGS)	3	1h	-2.0 K				5		
R04 – WC.H	Überwachung der Sommerabschaltung des Heizbetriebes in einem Heizkreis	d=Tra+5.0-Tsup	Die Außentemperatur (Tsa) überschreitet am Tag (P1, P2) bzw. in der Nacht (P2, P1) vorgeg. Maximalwerte (P3 bzw. P4) f. d. „Sommerfall“ UND es gilt d<0 mehrmals nacheinander (TLR=120, TLY=60)	8	6h	06.00	18.00	20 °C	10 °C		Liegt kein „Sommerfall“ vor, erfolgt die Ausgabe „ohne Bew.“	
R05 – DHWP	Überwachung der Mindesthöhe der BW-Zirkulationstemperatur	Tret.sec	Die BW-Zirkulationstemperatur (Tret.sec) unterschreitet nacheinander mehrmals (TL) vorgeg. Grenzwerte (UGY=P1, UGR=P2)	4	6h	55 °C	50 °C			30		
R06 – DHWP	Überwachung der Maximalhöhe der BW-Temperatur	Tsup.sec	Die BW-Temperatur (Tsup.sec) überschreitet nacheinander mehrmals (TL) vorgeg. Grenzwerte (UGY=P2, UGR=P1)	4	6h	62 °C	60.5 °C			5		
R07 – DHWP	Überwachung der Mindesthöhe der BW-Temperatur	Tsup.sec	Die BW-Temperatur (Tsup.sec) unterschreitet nacheinander mehrmals (TL) vorgeg. Grenzwerte (UGY=P1, UGR=P2)	4	6h	54 °C	50 °C			10		
R08 – WC.H	Überwachung der Maximalhöhe der Rücklauftemperaturen in den Heizkreisen	dT=Tsup-Tret	Die Rücklauftemperatur im Heizkreis ist zeitweise höher als die Vorlauftemperatur (dT<0)	9	1h	1	5				Spez. Logik f. Fehleranz. (s.Text) ; Zusatzbed. f. Regelberechnung: Ansteuerung Heizventil>0% u. Volumenstrom>0 m³/h, sonst Ausgabe „ohne Bew.“	
R09 – BOI	Überwachung des Kesselfolgemanagers	B1BMS1, B2BMS1	Im Bewertungsfenster d. Größe P2 (=WS) ist jeweils die Anz. d. „LH-Flanken“ d. Betriebsmeldung d. Betriebsstufe 1 v. Kessel 1 UND Kessel 2 > P1 (=OGLHC)	4	1h	1	20			1		
R10 – BOI	Überwachung der Kesselaktung	B1BMS1, B1BMS2, B2BMS1, B2BMS2	Im Bewertungsfenster d. Größe P2 (=WS) ist jeweils die Anz. d. „LH-Flanken“ d. Betriebsmeldung d. Betriebsstufen 1 UND 2 des gleichen Kessels > P1 (=OGLHC)	5	1h	2	30			1		
R11 – WC.H	Überwachung auf Unterversorgung der Heizkreise	dTs=Tasm-Tssp	Die Differenz (dTs) der gemittelten Vorlauftemp. hinter d. Weiche (Tssm, Fensterg: P1) u. d. HK-Vorlauftemperatur (Tssp) unterschreitet mehrmals nacheinander (TL) einen Vorgabegrenzwert (imValY=P2 bzw. limValR=P3)	11	1.5h	60	0 K	-2 K		5		
R12 – BOI / WC.H	Überwachung der Kesselthermostatbegrenzung	B1BSB1, B1BMS1, B2BSB1, B2BMS1	Im Bewertungsfenster d. Größe P3 (=WS) ist d. Anz. d. „LH-Flanken“ der Anforderung v. Kessel-Betriebsstufe 1<P1 (=UGSBLHC) UND d. Anz. d. „LH-Flanken“ der Betriebsmeldung v. Kessel-Betriebsstufe 1 >P2 (=OGBMLHC), zzgl. Sonderfall: permanente Anforderung, Betriebsmeldung jedoch währenddessen 0	6	1h	1	2	30		1	Falls das Anforderungssignal bei Wahl von P1=1 dauerhaft 0 ist, wird unabh. v. d. Takthäufigkeit der Betriebsmeldung kein Fehler generiert	
R13 – BOI	Überwachung der Kesselansteuerung	B1BMS1, B1BMS2, B2BMS1, B2BMS2	Es tritt (TL mal nacheinander) eine unzulässige Wertekombination auf (Sperliste z. Z. Betriebsmeldung zeigt Kessel-Betriebsstufe 2, aber nicht gleichzeitig Kessel-Betriebsstufe 1)	3	1h					1		

Abbildung 8.2.4-21: Implementierte Demonstrator-Fehlerregeln - Übersicht und Konfiguration

Sie beinhaltet die folgenden Informationen:

- Spalte 1a – RNo: Regelnummer (Reihenfolge ist nicht von Bedeutung)
- Spalte 1b – Kat: Anwendungskategorie der Regel
 - WC.H: „statischer Heizkreis“ (Water Circuit.Heating)
 - HYDS: „hydraulische Weiche“ (Hydraulic Separator)
 - BOI: „Kessel“ (Boiler)
 - DHWP: „Warmwasserbereitung“ (Domestic Hot Water Preparation)
- Spalte 2 – Bezeichnung: Kurzbeschreibung des Überwachungsziels der Regel
- Spalte 3 – Bewertungsgröße:
 - Verwendung im Bedingungsteil der Regel bei der Fehlerbewertung
 - Verwendung in den zugehörigen Ergebnis-Plots der Regel
- Spalte 4 – Fehlerkriterium: das regelspezifische Fehler-Bewertungskriterium
- Spalte 5 – #P: Anzahl der Konfigurationsparameter P_i der Regel
- Spalte 6 – Trw:
 - Konfigurationsparameter für die Trendreichweite des im Ergebnis-Plot der Regel angezeigten Kurzfristtrends
 - für jede Regel in der Konfigurationsdatei separat festlegbar
- Spalte 7..10 – P_i: Auswahl d. wichtigsten, regelspez. Konfigurationsparameter

- Spalte 11 – TL:
 - Spezieller Konfigurationsparameter, über den in den Regeln u. a. festgelegt wird, wie oft zeitlich nacheinander das Fehlerkriterium auslösen muss, bevor tatsächlich ein Fehler ausgegeben wird (⇒ Verringerung der Meldehäufigkeit)
- Spalte 12 – Anmerkungen: enthält ggf. Zusatzinformationen zur Regel
- Spalte 13 – E: mögliche Anzeigeergebnisse einer Regel (Ampelfarben)

In den nachfolgenden Textabschnitten werden die implementierten Regeln im Detail beschrieben.

Regel 1 zeigt die Kombination des anhand von Messdaten angelernten QuaMo-Verfahrens zur Fehlererkennung in Kombination mit einer einfachen Grenzwertregel („WENN Grenzwertverletzung DANN Fehler“).

Ziel der Anwendung von Regel 1 ist es, Betriebsabweichungen von einem zuvor „erlernten Normalbetrieb“ eines Systems zu erkennen (Anomalie-Detektion) und in einem Ergebnis-Plot anzuzeigen. Hierfür wurde als zu bewertendes System ein Heizkreis aus dem Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale ausgewählt.

Wie bereits in Kapitel 8.2.4.1 beschrieben, wurden hierzu vom Projektpartner Fraunhofer ISE geeignete QuaMo-Modellroutinen entworfen (Eingaben: Außenlufttemperatur, Vorlauftemperatur, Ansteuerung Heizventil; Zustand/Ausgabe: Rücklauf-temperatur) und anhand der von Kieback&Peter bereitgestellten Messdaten aus dem Heizkreis vortrainiert.

Anschließend erfolgte in Zusammenarbeit mit Fraunhofer ISE die Integration der vom Projektpartner bereitgestellten Modell-Bibliotheken auf dem Demonstratormodul innerhalb der von Kieback&Peter installierten Testumgebung und die Implementierung als eigenständige Fehlererkennungsmethode für die kontinuierliche „Live-Anwendung“ im Heizkreis des Demonstrationsgebäudes.

Dabei wurden die in einem Betrachtungszeitfenster von einer Stunde jeweils im Minutenraster erzeugten, booleschen Fehlerergebnisse des Verfahrens aufsummiert und stündlich als aggregiertes Gesamtergebnis in einem Parameter auf der DDC der Testumgebung abgebildet.

Diese Fehlersumme (Q1HFC) wurde als Bewertungsgröße für die Implementierung in Regel 1 verwendet. Sie zeigt die von der QuaMo-Methode als „unwahrscheinlich“ gemeldeten Betriebszustandswechsel der vorausgegangenen Stunde.

Überschreitet die Fehlersumme einen Grenzwert, der in der Regelkonfigurationsdatei u. a. im Hinblick auf die Meldehäufigkeit geeignet zu wählen ist, wird im Ergebnis-Plot auf der Detailseite der Regel eine „rote Ampel“ (bei Überschreiten des Grenzwertes $OGR=P1$) oder eine „gelbe Ampel“ (bei Überschreiten von $OGY=OGR/2$) angezeigt.

Ein Beispiel zu Regel 1 ist in Kapitel 8.2.4.2.3 zu finden.

Regel 2 wurde zur Überwachung der Spreizung in den statischen Heizkreisen im Demonstrationsgebäude implementiert.

Statische Heizkreise mit Radiatoren oder Konvektoren werden bei der Gebäudeplanung mit einer bestimmten Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Rücklauf-temperatur, der sogenannten Spreizung, ausgelegt.

Im Normalfall beträgt die in der Planung zugrunde gelegte Spreizung für den „Auslegungsfall“ 20K, das heißt für die niedrigste angenommene Außentemperatur. Im Auslegungsfall werden die höchste Vorlauf-temperatur und der höchste Volumenstrom im Heizsystem erreicht.

Damit die in der Planung festgelegte, gewünschte Spreizung eingehalten wird, wird im Heizsystem ein „hydraulischer Abgleich“ durchgeführt, der gewährleistet, dass die Volumenströme des Heizungswassers durch die einzelnen Raumheizflächen auf die in der Planung festgelegten Werte begrenzt werden. Dadurch wird eine gleichmäßige Durchströmung des Heizsystems erreicht, und damit auch die vorgesehene Spreizung sichergestellt. Durch eine Überwachung der Spreizung kann der hydraulische Abgleich eines Heizsystems im Betrieb überwacht werden.

Bei der Gebäudeinbetriebnahme wird der hydraulische Abgleich inzwischen im Allgemeinen sorgfältig durchgeführt, jedoch kommt es bei vielen Gebäuden im Laufe der Zeit zu einer Verschlechterung des hydraulischen Abgleiches durch verschiedene technische Eingriffe:

- 1) Bei einer vermeintlichen Unterversorgung von Räumen, die sich nach subjektiver Ansicht der Nutzer zu langsam erwärmen, oder eine nur unzureichende Raumtemperatur erreichen, wird durch das haustechnische Personal häufig die Voreinstellung der betreffenden Heizkörper erhöht. Dadurch werden diese Heizflächen von einem größerem Volumenstrom durchflossen, und können eine größere Leistung abgeben.
- 2) Falls dem haustechnischen Personal die Versorgung insgesamt zu knapp erscheint, werden häufig die Förderhöhen der Pumpen, und damit der gesamte Volumenstrom, vergrößert.
- 3) Bei einem Austausch von Heizkörpern oder deren Ventilen werden die Werte der Voreinstellungen nicht übernommen, bzw. angepasst.
- 4) Beim Austausch von Pumpen werden häufig Typen mit größerer Leistungsfähigkeit gewählt, die einen größeren Volumenstrom im Heizsystem zur Folge haben.

Durch all diese Eingriffe wird jedoch der hydraulische Abgleich des Heizsystems gestört, ein kosten- und komfortoptimaler Betrieb ist dann nicht mehr möglich.

Die Überwachung der Spreizung eines Heizsystems ist ein guter Indikator dafür, ob der hydraulische Abgleich im Großen und Ganzen gemäß der Planung durchgeführt und bewahrt wurde.

Implementiert wurde die Regel auf dem Demonstratormodul zur Anwendung innerhalb der Testumgebung für alle Heizkreise im Demonstrationsgebäude.

Die Realisierung erfolgte durch Grenzwertüberwachung der Temperaturdifferenz $dT (=T_{\text{sup}}-T_{\text{ret}})$, wobei die folgenden Vorbedingungen zur Regelberechnung erfüllt sein müssen:

- Vorlauftemperatur $T_{\text{sup}} > \text{UGNC}$ (=P1; initial: 55 °C)
- Ansteuerung Heizventil $Y > 0$ [%]
- Volumenstrom $V_p = \dot{V} > 0$ [m³/h]

Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, zeigt die Regel im Ergebnis-Plot eine „farblose Ampel“. Das Fehlersignal in der untersten Zeile im Diagramm des Ergebnis-Plots wird in diesem Fall auf „ohne Bewertung“ gesetzt (NC).

Sind die Bedingungen dagegen erfüllt, und unterschreitet die Temperaturdifferenz dT mehrmals nacheinander (TL; initial: 5 Minuten) einen gewählten, ersten Grenzwert UGD_{TY} (=P2; initial: 17.5 K) wird im Ergebnis-Plot der Regel auf der Detailseite eine „gelbe Ampel“ angezeigt. Unterschreitet dT darüber hinaus für die gleiche Zeit einen zweiten, restriktiveren Grenzwert UGD_{TR} (=P3; initial: 15 K) wird eine „rote“ Ampel angezeigt.

Waren die beiden erst genannten Regeln der Anwendungskategorie „statische Heizkreise“ zuzuordnen, erfolgt nun die Beschreibung einer Fehlererkennungsregel für die Kategorie „hydraulische Weiche“.

Regel 3 wurde zur Überwachung der Durchströmung der hydraulischen Weiche im Demonstrationsgebäude im regelbasierten System auf dem Demonstratormodul integriert. Dabei wurde speziell der Test auf eine „primäre Kurzschlussströmung“ implementiert.

Hierzu wird die Temperaturdifferenz SDIFF_{1_2} bestimmt, und auf Grenzwertunterschreitung (< 0) überprüft:

$$\text{SDIFF}_{1_2} = \text{SUM}_1 - \text{SUM}_2 = (T_{\text{sp}} + T_{\text{rs}}) - (T_{\text{rp}} + T_{\text{ss}})$$

mit

T_{sp} = Vorlauftemperatur auf Kesselseite

T_{rs} = Rücklauftemperatur auf Verbraucherseite

T_{rp} = Rücklauftemperatur auf Kesselseite

T_{ss} = Vorlauftemperatur auf Verbraucherseite

Wenn SDIFF_{1_2} negative Werte annimmt, dann liegt eine primärseitige Überströmung der hydraulischen Weiche vor: Der Volumenstrom der Kesselanlage ist größer als der Volumenstrom der Verbraucherseite. Dieser Betriebszustand führt zu erhöhten Betriebskosten, und sollte daher in Heizungsanlagen möglichst vermieden werden. Dazu können Kesselpumpen mit variablem Förderstrom und mit einer dieser Regel 3 entsprechenden Pumpenregelung eingesetzt werden. Der Volumenstrom der Kesselpumpen wird dann so ausgeregelt, dass der Wert für $\text{SDIFF}_{1_2} = 0$ ist.

In unserer Testimplementierung gelten die folgenden Grenzwerte: Unterschreitet SDIFF_{1_2} einen gewählten Grenzwert UGS_{<0} (=P1; initial: -2 K) über eine vorzugebende Zeitdauer von TLR+1 Minuten (TL, initial: 5 $\Rightarrow$ TLR=TL-1=4) wird im Ergebnis-Plot der Regel eine „rote Ampel“ angezeigt. Wird der Grenzwert nur für eine

Zeitdauer von $(TLR+1)/2$ Minuten unterschritten, wird stattdessen eine „gelbe Ampel“ ausgegeben – siehe hierzu auch Kapitel 8.2.4.2.3.

Weitere Details zum Hintergrund der Regel sind in „Arbeitskreis der Professoren für Regelungstechnik: Digitale Gebäudeautomation, Springer Verlag, 3. Auflage 2004, Seite 412: Brennwertkessel mit druckarmem Unterverteiler“ zu finden.

Zur Überwachung der Sommerabschaltung des Heizbetriebes wurde exemplarisch für einen Heizkreis im Demonstrationsgebäude **Regel 4** implementiert.

Grundidee von Regel 4 ist das folgende Kriterium zur Fehlerbewertung: Überschreitet die Außentemperatur (T_{oa}) am Tag (P1 bis P2; initial 06:00 bis 18:00 Uhr) bzw. in der Nacht (P2 bis P1) vorgegebene Maximalwerte (Tag: P3, initial 20 °C; Nacht: P4, initial 10 °C) wird von einem „Sommerfall“ ausgegangen. Liegt gleichzeitig die Vorlauftemperatur (T_{sup}) über der Raumtemperatur (T_{ra} ; zzgl. Offset 5 K), so wurde ein unzulässiger „Heizfall“ erkannt. Dabei werden gewisse Mindestzeiten der kontinuierlichen Überschreitung für einen tatsächlichen Fehlerfall angenommen. Wird das Kriterium für eine Zeitdauer von 60 Minuten erfüllt wird eine „gelbe Ampel“ angezeigt. Wird das Kriterium sogar über mindestens 120 Minuten lang erfüllt, wird eine „rote Ampel“ angezeigt.

Wird nach der oben angegebenen „Grenzwertheuristik“ kein „Sommerfall“ erkannt, so wird im Ergebnis-Plot als Fehlersignal „ohne Bewertung“ (NC) angezeigt und die Ampel bleibt farblos.

Mit dieser sehr einfachen Regel können vielfältige Fehleinstellungen der Regelung und Anlagendefekte, wie z.B. nur unvollständig schließende Ventile, erfasst werden, ohne dass dafür Signale oder besondere Funktionen der eingesetzten Regelungstechnik selbst benötigt werden. Die Regel arbeitet autonom, und verwendet lediglich ein sehr einfaches Verhaltensmodell.

Zur kontinuierlichen Überprüfung der geeigneten Temperaturniveaus des Subsystems „Warmwasserbereitung“ im Demonstrationsgebäude wurden drei Regeln entworfen und im regelbasierten System auf dem Demonstratormodul umgesetzt.

Zur Überwachung der Mindesthöhe der Temperatur im Zirkulationsrücklauf des Brauchwasserkreises wurde **Regel 5** implementiert.

Wird im Zirkulationsrücklauf innerhalb einer bestimmten Zeit nicht eine Temperatur von 55 °C erreicht, so kann dies u. a. auf

- eine unzureichende Zirkulationsvorlauftemperatur,
- zu große Temperaturverluste im Brauchwassernetz (z.B. mangelhafte Dämmung),
- einen zu niedrigen Zirkulationsvolumenstrom oder
- einen mangelhaften Abgleich der Brauchwasserstränge

hindeuten.

Die Fehlerbewertung in Regel 5 wird dabei anhand der Höhe der gemessenen Zirkulationsrücklauftemperatur $T_{\text{ret.sec}}$ vorgenommen. Unterschreitet diese für eine bestimmte Zeit (TL; initial: 30 Minuten – vgl. Abbildung 8.2.4-21) kontinuierlich den Vorgabewert 55 °C (P1), so erfolgt die Ausgabe einer Warnung („gelbe Ampel“). Wird für die gleiche Zeit sogar ein Wert von 50°C (P2) unterschritten, wird der erkannte Fehler als „Alarm“ angezeigt („rote Ampel“).

Die Zirkulationsrücklauftemperatur ist durch die Forderungen in der neuen Trinkwasserverordnung von einem reinen Komfortkriterium zu einem der wichtigsten Kennwerte der Trinkwasserhygiene geworden. Die Schwierigkeit liegt dabei darin, dass eine Forderung nach einer Mindesttemperatur des Zirkulationsrücklaufes „zu jeder Zeit“ in realen Anlagen nicht eingehalten werden kann. Durch Wasserentnahmen der Nutzer kommt die Zirkulation im Brauchwassernetz regelmäßig zum Erliegen, mit der Folge, dass die Zirkulationstemperatur bei und nach der Wasserentnahme zwangsläufig absinkt. Für die Trinkwasserhygiene sind diese kurzzeitig auftretenden, niedrigeren Temperaturen unschädlich, und nur dauerhafte Unterschreitungen der Mindesttemperaturen sollten daher auch überwacht werden. In der Praxis ist daher ein Wert für TL von z.B. 120 Minuten praxisgerecht.

Zu hoch eingestellte Brauchwassertemperaturen bergen verschiedene Risiken, insbesondere die Gefahr der Verbrühung - z. B. bei der Pflege von Säuglingen oder Kranken.. Darüber hinaus besteht auch die Gefahr der Verkalkung von Wärmetauschern.

Für die Überwachung auf zu hoch eingestellte Brauchwassertemperaturen wurde **Regel 6** implementiert. Überschreitet der vom Brauchwasser-Vorlauffühler ($T_{\text{sup.sec}}$) gemessene Wert für eine bestimmte Zeitdauer (TL; initial: 5 Minuten – vgl. Abbildung 8.2.4-21) kontinuierlich einen konfigurierbaren Grenzwert in Höhe von 60.5 °C (P1) wird eine Warnung ausgegeben („gelbe Ampel“). Überschreitet der Istwert für die gleiche Zeit sogar den Wert 62 °C (P2) wird ein Alarm („rote Ampel“) angezeigt. Eine kurzzeitige Überschreitung der maximalen Brauchwassertemperatur ist unkritisch, da durch die Pufferwirkung des Brauchwassernetzes diese kurzzeitigen Temperaturüberhöhungen nicht an den Zapfstellen ankommen. Daher ist eine Mindestzeit von z.B. 5 Minuten praxisgerecht, und verhindert u.U. unnötige Fehlermeldungen.

Zu niedrig eingestellte Brauchwassertemperaturen können eine Gefahr für die Trinkwasserhygiene darstellen, bis hin zur Bildung von Legionellen in gesundheitsgefährdender Anzahl.

Mit **Regel 7** wurde eine Möglichkeit zur Überwachung der eingestellten Mindesthöhe der Brauchwassertemperaturen implementiert. Ein Unterschreiten der vom Brauchwasservorlauffühler gemessenen Mindesttemperatur von 54 °C (P1) führt zur Ausgabe einer Warnung („gelbe Ampel“), wenn dies über einen Zeitraum von 10 Minuten (TL) geschieht. Ein Unterschreiten von 50 °C (P2) für die gleiche Zeitdauer führt zur Ausgabe eines Alarms („rote Ampel“). An dieser Stelle sei noch einmal auf die einfache Konfigurierbarkeit der einzelnen Grenzwerte und Zeiten hingewiesen. So besteht die Möglichkeit - bei Vorliegen einer entsprechenden Berechtigung für die Änderung der Konfigurationsdatei - leicht im laufenden Betrieb des regelbasierten

Systems ggf. noch restriktiver als die oben angegebenen Vorgaben einrichten zu können.

Mit **Regel 8** wurde eine weitere Überwachungsregel für die Anwendungskategorie „statische Heizkreise“ (WC.H) umgesetzt.

Liegt die gemessene Rücklauftemperatur in einem Heizkreis dauerhaft höher als die zugehörige Vorlauftemperatur, so kann dies häufig auf eine Fehlzurordnung von Vorlauf- und Rücklauffühler zurückgeführt werden, z. B. auf Grund einer falschen Bezeichnung oder vertauschten Montage.

Ist die gemessene Rücklauftemperatur dagegen nur temporär größer als die Vorlauf-temperatur, so kann dies ein Indiz für eine Fehlströmung in den Verbraucherkreisen sein, z. B. auf Grund defekter oder fehlender Rückschlagklappen oder auf Grund von Ventilen, die nicht sicher schließen.

Zur Erkennung solcher Fehler im Demonstrationsgebäude wurde in Form von Regel 8 eine Überwachung der Maximalhöhe der Rücklauftemperaturen in den Heizkreisen implementiert. Zur Fehlerbewertung wird erneut die Spreizung $dT (=T_{sup}-T_{ret})$ im Heizkreis herangezogen. Bei negativer Spreizung ist die Rücklauftemperatur größer als die Vorlauftemperatur und kann je nach Häufigkeit des Auftretens innerhalb eines zu wählenden Zeitfensters als ein entsprechender Fehlerindikator verwendet werden.

Abweichend von den anderen Regeln wurde bei der Anwendung von Regel 8 die Nutzung einer Vorgabeheuristik zur Fehlerbewertung und Festlegung der zugehörigen Ampelfarben erprobt (siehe Abbildung 8.2.4-22).

Ausgehend vom aktuellen Zustand zum Zeitpunkt t_k wird ein historisches Zeitfenster der Größe $2 \cdot WS$, aufgeteilt in zwei Hälften W_{k-1} und W_k , verwendet. Die Bewertung erfolgt mit Hilfe eines Grenzwertes ($limCnt$). Ausgehend von der initialen Regelkonfiguration (siehe Abbildung 8.2.4-21 mit $limCnt=P1$ und $WS=P2$) ergäbe damit z. B. die Konstellation $[ErrSum(W_{k-1}), ErrSum(W_k)]=[1,0]$, also ein detektierter Fehler im Fenster W_{k-1} und kein Fehler im Fenster W_k , die Bewertung „grüne Ampel“ und $[ErrSum(W_{k-1}), ErrSum(W_k)]=[1,2]$ die Bewertung „rote Ampel“.

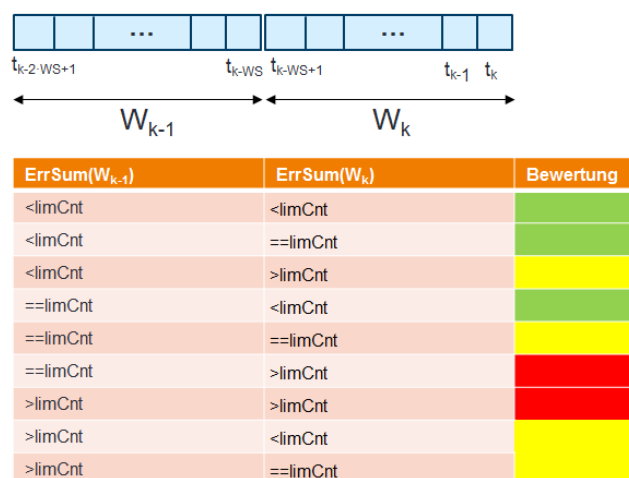


Abbildung 8.2.4-22: Regel 8 - Festlegung des Ergebniszustandes (Ampelfarbe)

Zur Ausführung der Regelberechnung nach Vorliegen der Mindestdatenmenge ($=2 \cdot WS$ Daten; initial: $P2=5 \Rightarrow 10$ Minuten – vgl. Abbildung 8.2.4-21) wurden die aktive Ansteuerung des Heizventils durch den Heizkreisregler ($>0\%$) und ein Volumenstrom >0 zur Vorbedingung gemacht. Wird eine der beiden Zusatzbedingungen nicht erfüllt, entfällt die Regelberechnung und es wird in der Anzeige der Zustand „ohne Bewertung“ („farbloser Ampel“) ausgegeben.

Mit den Regeln 9, 10, 12 und 13 wurden verschiedene Regeln mit dem Anwendungsschwerpunkt „Kesselanlage“ (BOI) implementiert.

Regel 9 wurde zur Identifikation eines falsch eingestellten Kesselfolgemanagers in das regelbasierte System aufgenommen.

Im Zusammenhang mit falsch eingestellten Algorithmen für das Management der Betriebsfolge eines Führungs- und eines Folgekessels kann insbesondere ein unerwünschtes „Takten“ der beiden Kessel auftreten. Die Kesselanlage wechselt in häufiger Folge z. B. zwischen den Zuständen „Betriebsstufe 1 beider Kessel AN“ und „Betriebsstufe 1 beider Kessel AUS“ hin und her. Solltemperaturen werden in der Folge zu langsam erreicht, und der Energieverbrauch der Anlage ist unnötig hoch.

Zu den Ursachen zählen z.B. zu klein eingestellte Hoch- und Rückschaltintegrale und Temperaturdifferenzen sowie eine zu kleine Sollwertüberhöhung des Folgekessels – wenn eine solche überhaupt eingerichtet wurde!

In Regel 9 wurde exemplarisch eine vereinfachte Zykluserkennung für die im Demonstrationsgebäude vorhandenen beiden Kessel (Schaltstufen: „Stufe1 EIN/AUS“ und „Stufe 2 EIN/AUS“) auf Basis der Betriebsmeldungen der jeweils ersten Kesselstufe implementiert.

Hierbei wird unabhängig voneinander die Anzahl der in einem Vorgabezeitfenster der Breite $WS (=P2)$; initial: 20 Minuten – vgl. Abbildung 8.2.4-21) aufgetretenen „Low-High-Flanken“ des Betriebsmeldungssignals der ersten Betriebsstufe von Kessel 1 (B1BMS1) und des Betriebsmeldungssignals der ersten Betriebsstufe von Kessel 2 (B2BMS1) bestimmt. Überschreitet bei beiden Signalen die Anzahl der ermittelten Flankenwechsel einen vorgegebenen Grenzwert OGLHC ($=P1$; initial 1) so wird je nach parametrierter Auftrittshäufigkeit (TL; initial: 1) und den daraus abgeleiteten Grenzwerten (OGY, OGR) ein Fehler, als Warnung („gelber Ampel“; Grenzwert: $OGY=(TL-1)/2$) oder Alarm („roter Ampel“; Grenzwert: $OGR=TL-1$), angezeigt. Ergeben sich auf Grund der Festlegung der Auftrittshäufigkeit identische Grenzwerte für die Bestimmung des Fehlerlevels, wird der Zustand Alarm („roter Ampel“) angezeigt.

Zur Veranschaulichung der Funktionsweise der oben beschriebenen Fehlerregel wurde Regel 9 mit Testsequenzen für die Betriebsmeldungssignale der beiden Kessel beaufschlagt (siehe Abbildung 8.2.4-23). Zusätzlich wurden die Debugging-Ausgaben eingeschaltet. Wie man in der Abbildung erkennen kann, werden bei beiden Signalen stets mindestens zwei Flankenwechsel (siehe Diagrammzeilen 2 und 4; Signale B1BMS1LHC und B2BMS1LHC) innerhalb des vorgegebenen Zeitfensters ($WS=20$ Minuten) registriert, das sind mehr Flankenwechsel als zulässig ($OGLHC=1$). Die Verknüpfung der beiden Fehlersignale ergibt damit stets einen

Kieback&Peter GmbH & Co. KG
AP A.5 Implementierung und Evaluation in Gebäudeautomationssystemen



AP A.5-72

AP A.5-72

AP A.5-72

AP A.5-72

desselben Kessels (B1BMS2) entsprechend ausgewertet. Verletzen beide Überprüfungen die Grenzwertvorgabe, so wird wie in Regel 9 je nach parametrierter Auftretshäufigkeit (TL; initial: 1) und den daraus abgeleiteten Grenzwerten (OGY, OGR) ein Fehler, als Warnung („gelbe Ampel“; Grenzwert: $OGY=(TL-1)/2$) oder Alarm („rote Ampel“; Grenzwert: $OGR=TL-1$), angezeigt.

Zur Überwachung einer Unterversorgung von Heizkreisen im Demonstrationsgebäude wurde **Regel 11** implementiert.

Ziel der Fehlererkennung ist es in diesem Fall, Situationen zu identifizieren, in denen die vom Wärmeerzeugerkreis im Mittel bereitgestellte Vorlauftemperatur auf Grund von Zusatzmaßnahmen, wie z.B. einer zu restriktiv eingestellten Kesselthermostatbegrenzung, nicht mehr ausreicht, um die vom Heizkreis errechnete Vorlaufsolltemperaturanforderung zu decken. Zusätzlich kann auch z.B. eine sekundärseitige Überströmung der hydraulischen Weiche eine Absenkung der sekundären Vorlauftemperatur verursachen. Auch in diesem Fall ist die Versorgung der Verbraucherkreise beeinträchtigt, jedoch ohne eine zu geringe Vorlauftemperatur der Primärseite die Ursache dafür ist.

Als Voraussetzung für die Fehlerbewertung wird dementsprechend bei der Regelabarbeitung mittels rollierender Mittelwertbildung mit Fenstergröße WS (=P1; initial 60) aus der vom Erzeugerkreis hinter der Weiche bereitgestellten Vorlauftemperatur T_{ss} zunächst die gemittelte Vorlauftemperatur $T_{ss,m}$ bestimmt. Durch Subtraktion der angeforderten Vorlaufsolltemperatur des Heizkreises T_{ssp} wird anschließend als Bewertungsgröße die Temperaturdifferenz dTs ermittelt. Unterschreitet diese den parametrierten Grenzwert $limValY$ (=P1; initial 0 K) in der im Parameter TL (initial 5) festgelegten Häufigkeit nacheinander mehrmals, so wird eine Warnung für den Heizkreis ausgegeben („gelbe Ampel“). Wird sogar der Vorgabegrenzwert $limValR$ (=P2; initial -2 K) in derselben Häufigkeit unterschritten, so erfolgt die Anzeige eines Alarms („rote Ampel“). Die Bewertung wird nacheinander für jeden Heizkreis des Demonstrationsgebäudes ausgeführt und auf der Detailseite der Fehlerregel angezeigt. Als aggregiertes Gesamtergebnis wird auf der Übersichtsseite der Fehlerregeln das jeweils kritischste Bewertungsergebnis der einzelnen Heizkreise angezeigt.

Zur Identifikation zu niedrig, d.h. nicht auf „Automatik“, eingestellter Kesselthermostaten wurde auf Grund des hohen Einsatzpotenzials im Demonstrationsgebäude mit **Regel 12** noch eine weitere Fehlererkennungsregel implementiert.

In Regel 12 wird für beide Kessel nacheinander geprüft, ob innerhalb eines gewählten Betrachtungszeitraums der Größe WS (=P3; initial 30 Minuten) ein „Takten“ des Betriebsmeldungssignals der ersten Betriebsstufe (B{1,2}BMS1) bei gleichzeitig kontinuierlich anliegendem Anforderungssignal von der Regelung (B{1,2}SBS1) festgestellt werden kann.

Realisiert wurde dies in der Implementierung – ähnlich wie in Regel 9 und 10 – durch Bestimmen und Bewerten der Anzahl der „Low-High-Flanken“ der relevanten Signale im Betrachtungsfenster. Unterschreitet die Anzahl der „Low-High-Flanken“ im Anforderungssignal für die erste Stufe eines Kessels (B{1,2}SBS1) einen vorgegebenen Grenzwert UGSBLHC (=P1; initial 1; Bedeutung hier: permanente Anforderung

rung) und überschreitet gleichzeitig die Anzahl der „Low-High-Flanken“ der Betriebsmeldung der ersten Kessel-Betriebsstufe (B{1,2}BMS1) den Grenzwert OGBMLHC (=P2; initial 2), so wird je nach parametrierter Anforderung an die Auftrittshäufigkeit (TL; initial: 1) im Fehlerfall ein Alarm („rote Ampel“) angezeigt. Bei dieser Regel wird nur zwischen Ok („grüne Ampel“) und Alarm („rote Ampel“) unterschieden.

Ein Sonderfall bezogen auf den Regelkontext liegt vor, wenn zwar permanent eine Anforderung ansteht, jedoch keine Betriebsmeldung des Brenners: „Brenner Ein“ registriert wird. Dieser Fall wird von der Regel als Fehler gewertet (i. S. v. „permanente Begrenzung“) und als Alarm („rote Ampel“) angezeigt (siehe Abbildung 8.2.4-24).

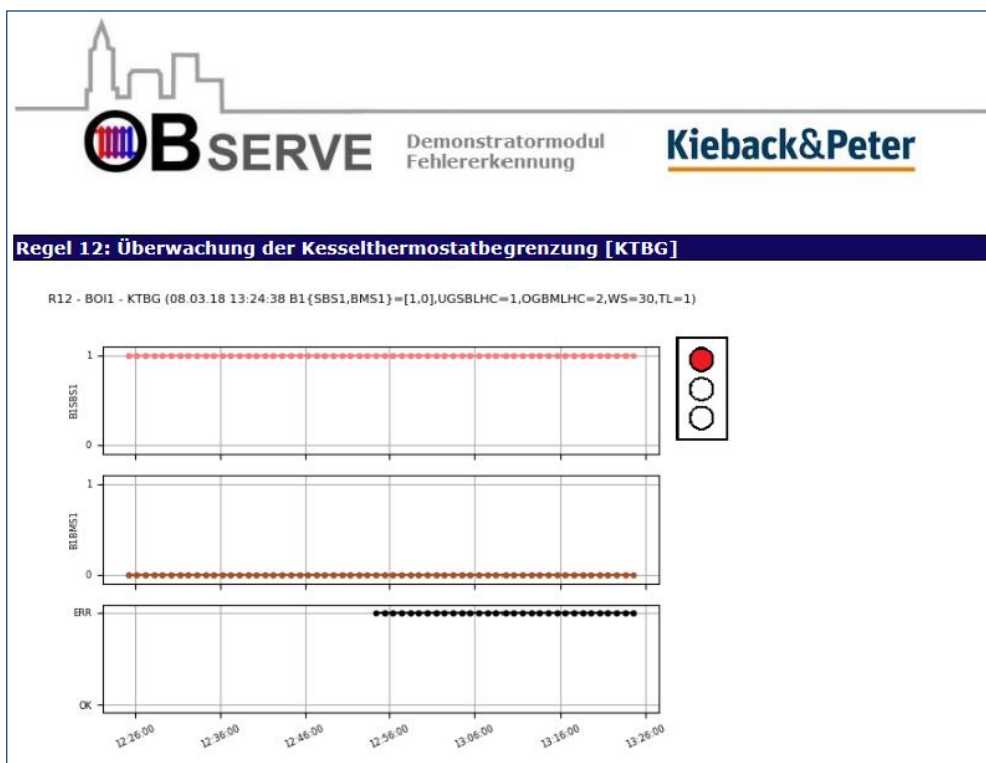


Abbildung 8.2.4-24: Regel 12 – Sonderfall: permanente Anforderung, aber keine Betriebsmeldung

Die Fehlerbewertung in Regel 12 wird nacheinander für beide Kessel des Demonstrationsgebäudes ausgeführt und auf der Detailseite der Fehlerregel angezeigt. Als aggregiertes Gesamtergebnis wird auf der Übersichtsseite der Fehlerregeln das kritischere Bewertungsergebnis beider Kessel angezeigt.

Abschließend wurde in der Anwendungskategorie „Kessel“ mit **Regel 13** noch eine Sonderregel zur Generierung von Fehlermeldungen beim Auftreten unzulässiger Wertekombinationen der Kesselansteuersignale aufgenommen, um damit einen Hinweis bei einem möglichen Defekt des Kesselansteuergerätes erhalten zu können. Exemplarisch wurde in die hierfür eingerichtete „Sperrliste“ die unzulässige Wertekombination „Betriebsmeldung der ersten Kessel-Betriebsstufe AUS“ (B{1,2}BMS1==0) und gleichzeitig „Betriebsmeldung der zweiten Betriebsstufe des gleichen Kessels EIN“ (B{1,2}BMS2==1). Auch bei dieser Regel kann die Auftrittshäufigkeit parametrierbar werden (TL; initial 1), und das Gesamtergebnis auf der

Übersichtsseite wird durch das kritischere Bewertungsergebnis der Kessel- Einzelbewertungen auf der Detailseite bestimmt. Es sei jedoch vorweggenommen, dass ein entsprechendes Auslösen der Regel (Fehlerfall) während des Testzeitraumes nur mittels simulierter, fehlerbehafteter Eingangssignale provoziert werden konnte.

8.2.4.2.3 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Die in Kapitel 8.2.4.2.2 beschriebenen Fehlerregeln wurden innerhalb der in Kapitel 8.2.4.1.1 und 8.2.4.2.1 beschriebenen Testumgebung in der Implementierungs- und Plausibilisierungsphase zunächst anhand von aufgezeichneten oder speziell vorgegebenen Testdaten hinsichtlich ihrer Funktionsweise überprüft. Die Daten wurden dabei entweder direkt aus CSV-Dateien in der Implementierung eingelesen, oder aber dieser indirekt unter Nutzung von BACnet/IP über die hierfür vom Produktivbetrieb der realen Anlage abgekoppelte DDC der Testumgebung zugespielt.

Anschließend wurden die Fehlererkennungsregeln auch mit Kopplung der DDC der Testumgebung zum realen Anlagenbetrieb im Demonstrationsgebäude erprobt.

Dabei wurden zum einen den Messdaten auf der DDC additiv „Fehler-Offsets“ überlagert, um im laufenden Betrieb gezielt das Reaktionsverhalten der implementierten Regeln untersuchen und optimieren zu können, sowie um die installierte Fehlermeldekette (siehe Kapitel 8.2.4.1.1) zu überprüfen.

Zum anderen wurden die Regeln zur Überwachung des täglichen Anlagenbetriebes im Demonstrationsgebäude Kieback&Peter-Zentrale eingesetzt. Dabei wurden zusätzlich zu Testzwecken temporär und kontrolliert spezifische Fehlerzustände in einem Subsystem des Demonstrationsgebäudes manuell ausgelöst.

So wurde aus dem „Normalbetrieb“ heraus („Ruhelage“; Stellgröße Regler: $Y \approx 50\%$) die Ansteuerung des Regelventils eines Heizkreises von Automatikbetrieb auf Handverstellung umgeschaltet und das Ventil manuell voll geöffnet. Erst nach ungefähr einer Stunde wurde dann wieder auf Automatikbetrieb zurückgestellt.

Diese bewusst erzeugte Fehlersituation wurde zum Test der QuaMo-Implementierung bzw. zum Test von **Regel 1** im regelbasierten System verwendet.

Abbildung 8.2.4-25 zeigt die Detailseite von Regel 1 ca. 3 Stunden nach der Einbringung des Fehlers. Der Bereich, in dem der Fehler wirksam war, wurde in der Abbildung zur Veranschaulichung rosa markiert.

Anhand des dargestellten Trends kann man gut ablesen, wie um ca. 10:40 Uhr, dem Zeitpunkt der manuellen Ventilöffnung, die Vorlauftemperatur ansteigt (blaue Kurve in der Diagrammdarstellung), bis ein gewisses maximales Temperaturniveau erreicht ist (Wirkung der Kesselthermostatbegrenzung in der Gesamtanlage). Etwas zeitversetzt steigt auch die Rücklauftemperatur (grüne Kurve) an. Der Regler reagiert auf den Anstieg der Vorlauftemperatur, indem er das Stellsignal bis auf 0% reduziert (magenta Kurve). Die Außentemperatur (gelbe Kurve) liegt im Betrachtungszeitraum im Mittel bei ca. 6 °C und steigt während der Fehlerinjektion sogar leicht an. Mit der Rückschaltung auf den Automatikbetrieb fällt die Vorlauftemperatur zunächst fast sprunghaft auf die Höhe des Rücklauftemperaturniveaus ab, steigt dann aber mit

dem ebenfalls steigendem Stellsignal wieder an, bis etwa 45 Minuten später wieder die Ausgangssituation vor der gezielten Fehlerinbringung erreicht ist. Die Rücklauf-temperatur fällt nach der Rückschaltung zunächst zeitverzögert ab, steigt dann aber ebenfalls wieder an und erreicht nach ca. 60 Minuten wieder die Ausgangslage.

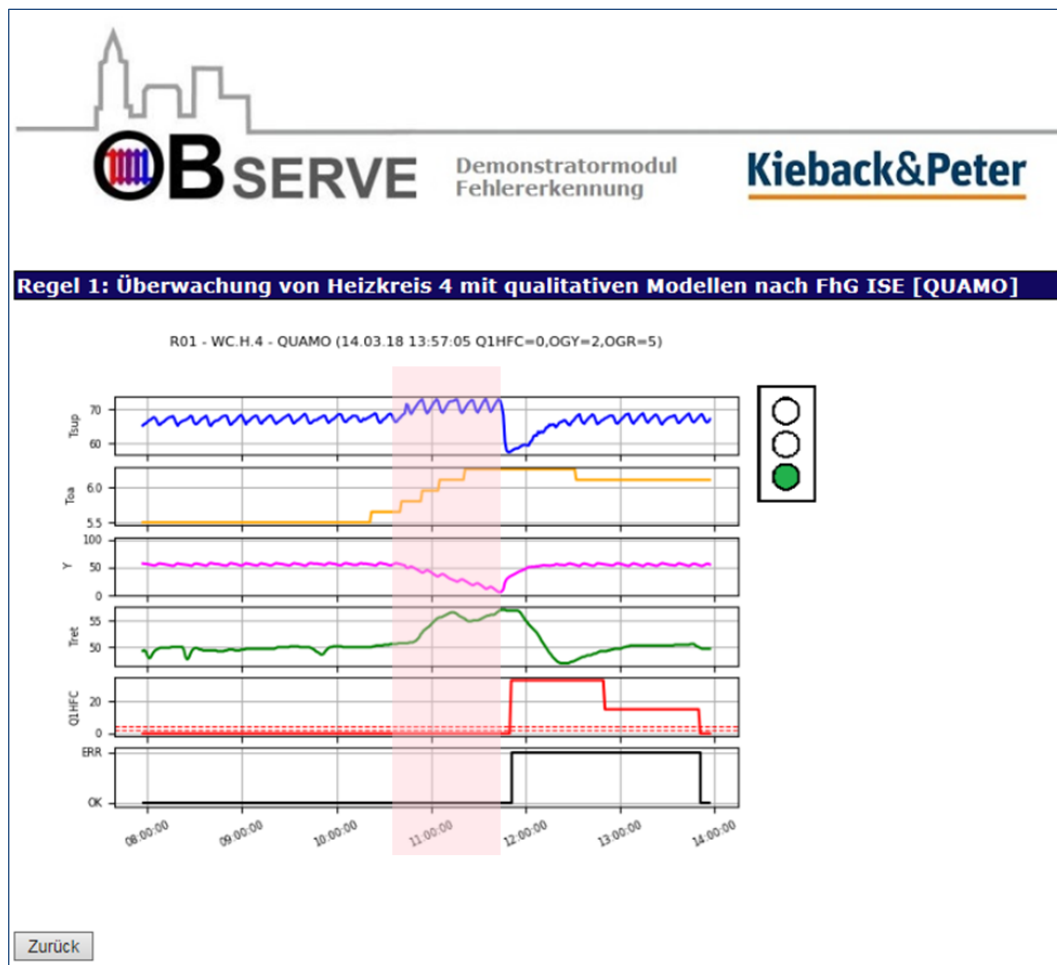


Abbildung 8.2.4-25: Test von Regel 1 über gezielte Fehlerinjektion in der Anlage

Wie man am Fehlersignal in der untersten Diagrammzeile ablesen kann, wurde etwa 60 Minuten nach der Fehlerinjektion auf Grund der Grenzwertüberschreitung des oberen Grenzwertes (OGR) für die Dauer von 2 Stunden ein Alarm („rote Ampel“) angezeigt. Der Zeitversatz ergibt sich dabei aus dem Berechnungszeitpunkt des QuaMo-Fehlerzählers und der Größe des Bewertungszeitfensters, das bei der QuaMo-Implementierung in Absprache mit dem Projektpartner Fraunhofer ISE festgelegt wurde (siehe Kapitel 8.2.4.1.1). Der hier im Stundenraster berechnete Fehlerzähler (Q1HFC, rote Kurve in der Diagrammdarstellung) steigt um ca. 11:40 Uhr von 0 auf über 30 Fehlerereignisse an. Eine Stunde später zeigt der Fehlerzähler immer noch ca. 15 detektierte Fehlerereignisse an. Erst nach 2 Stunden ist der Fehlerzähler wieder auf den Wert 0 zurückgefallen. Wie man Abbildung 8.2.4-25 entnehmen kann, befindet sich das System zu diesem Zeitpunkt wieder in der „Ruhelage“. Entsprechend erfolgt auch die Anzeige aktuell „kein Fehler“ („grüne Ampel“).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die gezielte Fehlerinjektion von der „QuaMo-Methode“ in Kombination mit der Grenzwertregel erfolgreich als Anomalie erkannt, und auf der Detailseite der Regel angezeigt wurde. Bleibt noch anzumerken, dass auf Grundlage von Regel 1 durch die erfolgte Grenzwertüberschreitung des Fehlerzählers über die installierte Fehlermeldekette folgerichtig auch eine entsprechende E-Mail-Benachrichtigung ausgelöst wurde.

Abbildung 8.2.4-26 zeigt für die gleiche Fehlersituation einen weiteren Ergebnis-Plot, der kurz nach der Rückschaltung auf den Automatikbetrieb des Regelventils von der Detailseite von **Regel 2** „Überwachung der Vorlauf-/Rücklauftemperaturspreizung ($dT = T_{\text{sup}} - T_{\text{ret}}$) der Heizkreise im Demonstrationsgebäude“ entnommen wurde. Dabei deckt die Trendanzeige nahezu den gesamten Zeitraum der Fehlerinjektion ab.

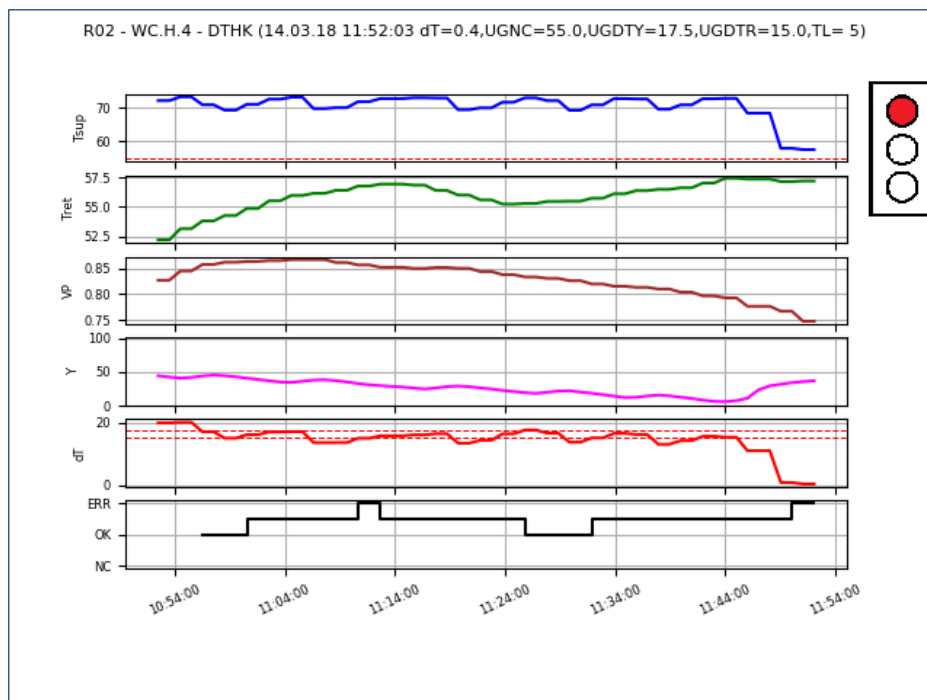


Abbildung 8.2.4-26: Test von Regel 2 nach gezielter Fehlerinjektion in der Anlage

Der zum Aufrufzeitpunkt 11:52 Uhr der Detailseite von Regel 2 bereits mehr als 5 Minuten lang sehr niedrige Wert der Spreizung wird im Hinblick auf die gewählten Grenzwerte ($<UGDTR$) korrekt als Auffälligkeit und auf Grund der Zeitdauer der Unterschreitung ($>TL$) als „Alarm“ angezeigt („rote Ampel“).

Anhand des Fehlersignals (unterste Diagrammzeile) kann man weiterhin ablesen, dass bereits um ca. 11:10 Uhr, also etwa 25 Minuten nach Auslösen des Fehlers, schon einmal kontinuierlich für mindestens 5 Minuten der zweite Grenzwert unterschritten und damit von der Regel eine Alarmmeldung ausgelöst wurde. Bis auf einen kurzen Zeitraum von ca. 11:26 Uhr bis ca. 11:32 Uhr, wo die Regel „kein Fehler“ ausgegeben hat, wurde ansonsten von der Regel der Zustand „Warnung – Spreizung im Heizkreis niedrig“ („gelbe Ampel“) ausgegeben, da die überwiegende Zeit mindestens der eingestellte erste Grenzwert ($UGDTY$) unterschritten wurde.

Wäre die Vorlauftemperatur noch weiter abgefallen ($<UGNC$), so hätte die Regel „ohne Bewertung“ („farblose Ampel“, Fehlersignalwert NC) ausgegeben.

Nachfolgend ist zur Veranschaulichung der Funktionsweise der in Kapitel 8.2.4.2.2 beschriebenen Fehlerregeln unabhängig von der oben beschriebenen Fehlersituation noch eine Auswahl weiterer Beispiele angegeben.

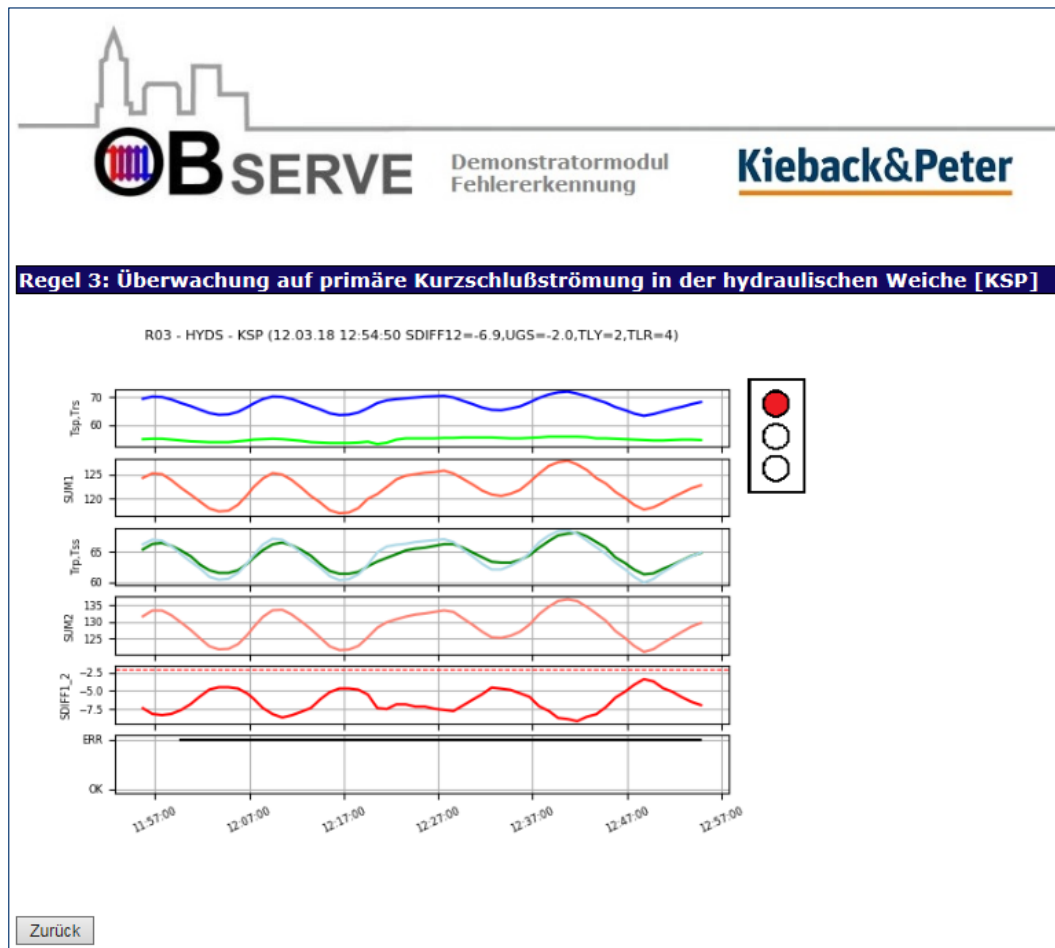


Abbildung 8.2.4-27: Beispiel zu Regel 3- Primäre Kurzschlusströmung in der hydr. Weiche (⇒Alarm)

Abbildung 8.2.4-27 demonstriert den Fehlerfall „Primäre Kurzschlusströmung in der hydraulischen Weiche“ gemäß **Regel 3**. In der gezeigten Betriebssituation wurde der konfigurierte, zulässige Grenzwert (UGS) von der errechneten Summendifferenz ($SDIFF_{1_2} = SUM_1 - SUM_2$) deutlich, und das nicht nur für die eingestellte Dauer von 2 ($TLY = (TLR + 1) / 2$) bzw. 5 Minuten ($TLR + 1$), sondern sogar während des gesamten Anzeigezeitraums von knapp einer Stunde, unterschritten. Demzufolge zeigt das Fehlersignal in der untersten Diagrammzeile permanent den Fehlerzustand (ERR) „Alarm“, was die Ausgabe einer „roten Ampel“ auf der Detailseite der Regel, ebenso wie auf der Übersichtsseite des regelbasierten Systems zur Folge hat.

In Abbildung 8.2.4-28 ist ein Beispiel zur Anwendungskategorie „Warmwasserbereitung“ dargestellt. Ziel von **Regel 6** ist die Überwachung der Maximalhöhe der Brauchwassertemperatur ($T_{sup.sec}$). Wie man in der Abbildung gut erkennen kann liegt beim Abruf der Detailseite der Regel kein Fehlerzustand vor. Keiner der beiden

konfigurierten Grenzwerte (OGY bzw. OGR) wird überschritten. Allerdings kann man der Trendanzeige und dem Fehlersignal entnehmen, dass gegen 14:30 Uhr der eingestellte untere Grenzwert in Höhe von 60.5 °C (OGY) kurzzeitig, aber für mindestens 5 Minuten (TL) lang überschritten wurde, weswegen zu diesem Zeitpunkt die Regel auch eine Warnmeldung („gelbe Ampel“; Fehlersignal: ERR/2) ausgegeben hat.

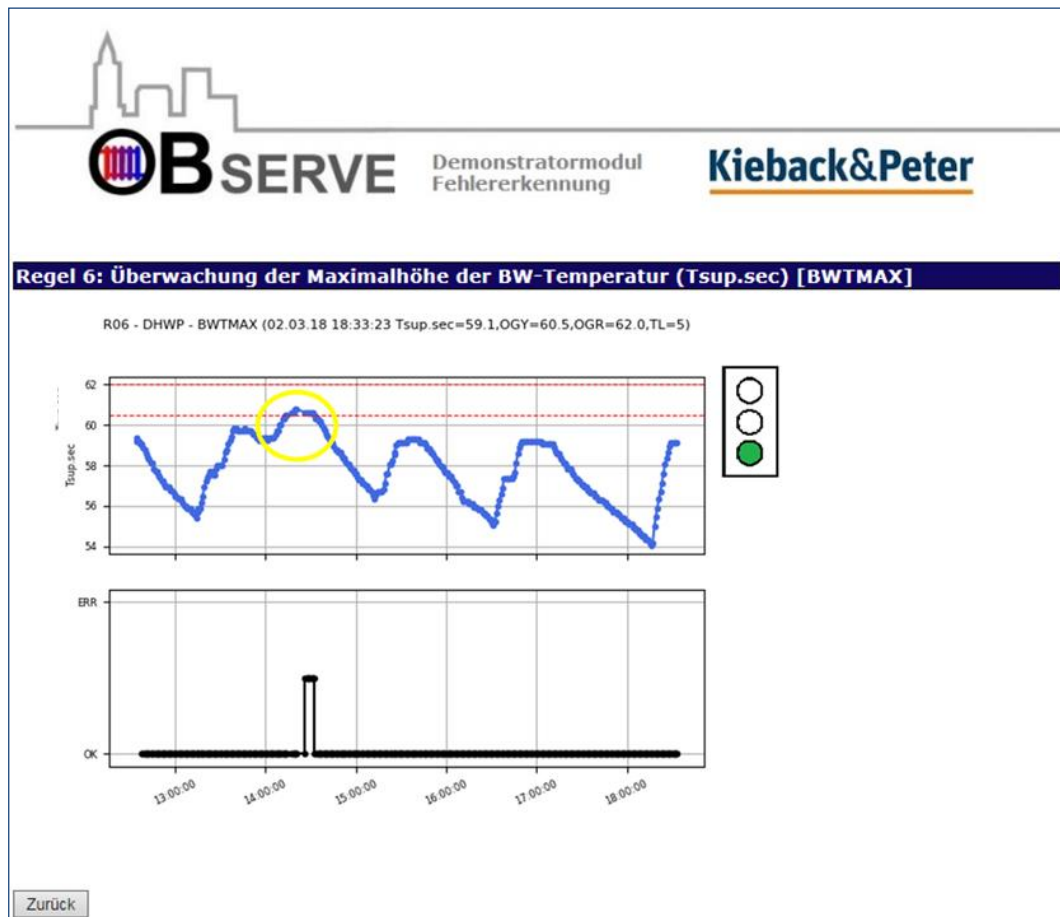


Abbildung 8.2.4-28: Beispiel zu Regel 6 – Kurzzeitige Überschreitung d. max. BW-Temperatur (⇒Warnung)

Das Beispiel in Abbildung 8.2.4-29 dient der Veranschaulichung der Funktionsweise von **Regel 11**. Mit der Regel wird überprüft, ob eine nach den Witterungsbedingungen für den Betrieb eines Heizkreises angeforderte Vorlaufsolltemperatur gemäß dem bereitgestellten Angebot vom Wärmeerzeugerkreis überhaupt erreicht werden kann. Wie man erkennen kann, liegt in der gezeigten Situation keine Unterversorgung des betrachteten Heizkreises vor. Die dem Heizkreis im Mittel vom Primärkreis zur Verfügung gestellte Vorlauftemperatur $T_{ss,m}$ (hellblaue Kurve) liegt während des bewertbaren Betrachtungszeitraumes, der nach Empfang der zur Mittelwertbildung erforderlichen Mindestdatenmenge hier etwa 30 Minuten beträgt, über der vom Heizkreis angeforderten Vorlaufsolltemperatur T_{ssp} (dunkelblaue Kurve). Die Bewertungsgröße $dT_s = T_{ss,m} - T_{ssp}$ wird im Betrachtungszeitraum nie negativ und das Fehlersignal zeigt folgerichtig auch keinen Fehler an („grüne Ampel“).

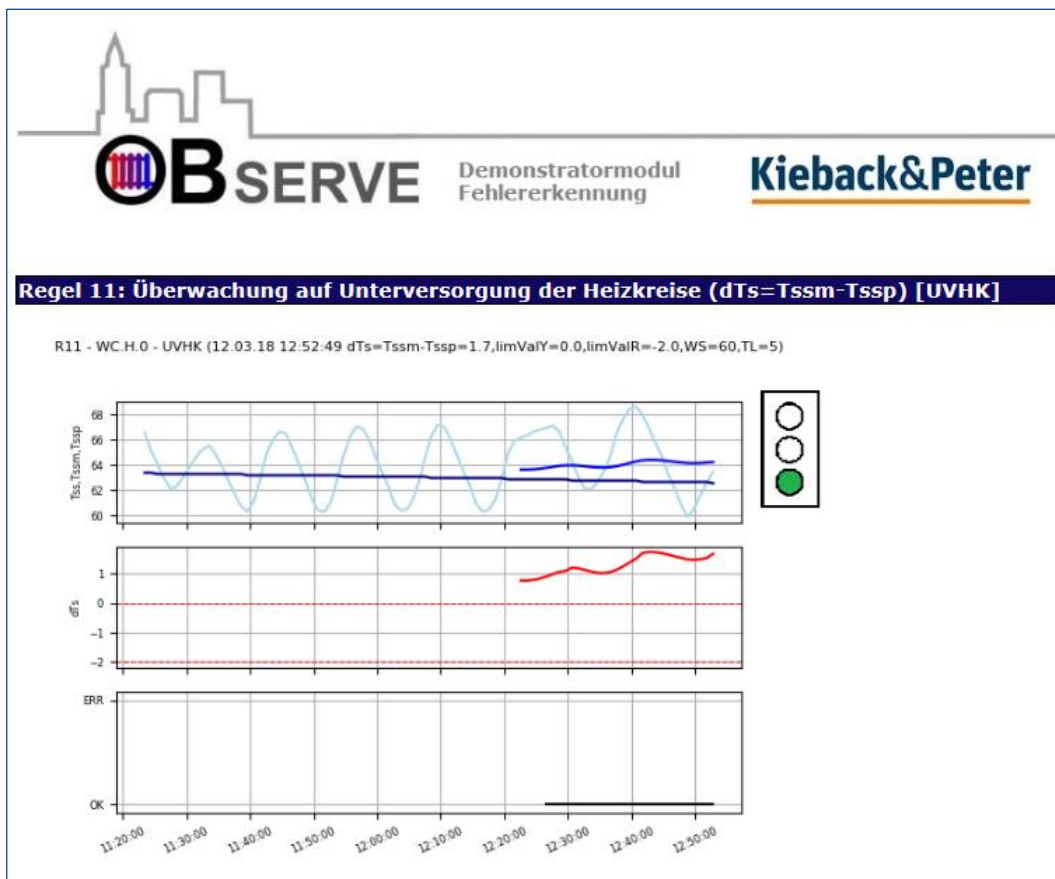


Abbildung 8.2.4-29: Beispiel zu Regel 11 – Heizkreis ausreichend versorgt (⇒kein Fehler)

Abschließend ist in Abbildung 8.2.4-30 noch ein Beispiel aus der Anwendungskategorie „Kesselanlage“ gezeigt. Zur Anwendung kommt hier **Regel 12**, mit der zu niedrig bzw. nicht auf „Automatik“ eingestellte Kesselthermostaten identifiziert werden sollen. Man kann in der Abbildung erkennen, dass trotz permanent anliegendem Anforderungssignal für die erste Kesselstufe (B1SBS1), die zugehörige Betriebsmeldung (B1BMS1) „taktet“. Die Kesselstufe wird auf Grund der anstehenden Anforderung zunächst eingeschaltet, jedoch kurze Zeit später auf Grund einer zu niedrig eingestellten Begrenzung trotz nach wie vor anliegendem Anforderungssignal wieder ausgeschaltet. Der Vorgang wiederholt sich mehrfach nacheinander. Da die Anzahl der „Low-High-Flankenwechsel“ der Betriebsmeldung innerhalb des Vorgabezeitfensters (WS [Minuten]) im bewertbaren Betrachtungszeitraum, d. h. nach Vorliegen der Mindestdatenmenge (WS+TL-1 [Minuten]) für die Regelberechnung immer den eingestellten Grenzwert (OGBMLHC) überschreitet (im Beispiel werden in jedem Zeitfensters 3 „Low-High-Flankenwechsel“ detektiert), zeigt die Regel korrekt dauerhaft den Alarmzustand („rote Ampel“) an.

Trotz - oder gerade wegen - der Einfachheit der gewählten Darstellungsformen, der vielfältigen Zugriffs- und Anzeigeeoptionen auf unterschiedlichen Endgeräten (z. B. über WLAN auch auf Tablet oder Smartphone) und der Transparenz der implementierten Fehlerregeln wurde eine äußerst positive Rückmeldung von verschiedensten Nutzern zu dem regelbasierten Ansatz erzielt.

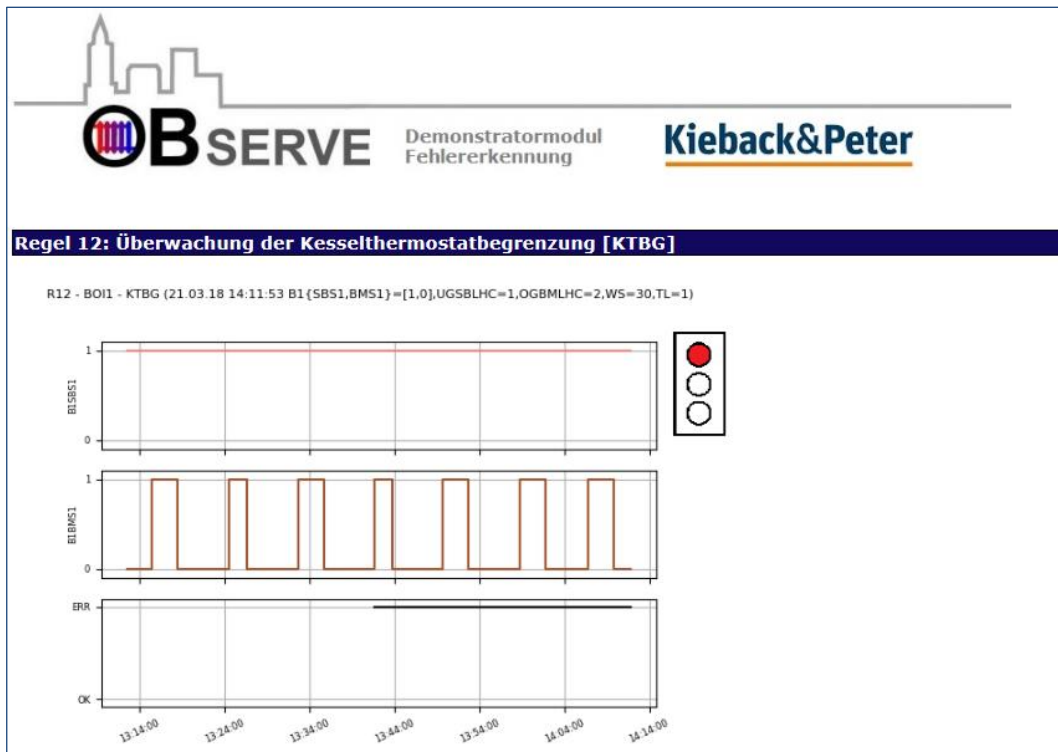


Abbildung 8.2.4-30: Beispiel zu Regel 12 – Kesselthermostatbegrenzung zu niedrig eingestellt (⇒ Alarm)

8.3 Zusammenfassung und Ausblick AP A.5

Am Ende eines langen und aufwendigen Projektes stellt sich immer die Frage nach der Bewertung der Arbeitsergebnisse. Insbesondere die weitere Verwendbarkeit des Erreichten ist dabei von besonderer Bedeutung. Im Fall der Mitarbeit von Kieback&Peter im Projekt „OBSERVE“ ist besonders hervorzuheben, dass zu Anfang des Projektes vor allem die Bereitstellung von Demonstratoren durch Kieback&Peter geplant war, die es den anderen Projektpartnern ermöglichen sollten, ihre Arbeitsergebnisse in praktischen Anwendungen zu evaluieren. Dieses Ziel wurde im Projekt „OBSERVE“ in hervorragender Weise erreicht. Darüber hinaus wurden von Kieback&Peter im intensiven Austausch mit den Projektpartnern und auch in einer eigenständigen Technologieentwicklung Ergebnisse erreicht, die weit über dieses ursprüngliche Ziel hinausgehen. Im Folgenden werden die erreichten Arbeitsergebnisse im Hinblick auf ihre praktische Anwendbarkeit bewertet.

Testumgebung:

Die Eignung der von Kieback&Peter zur Erfüllung der Demonstratoraufgaben im Arbeitspaket A.5 gestalteten Testumgebung (DDC4200e + Demonstratormodule) konnte bei der Evaluation der AMPC-SL-Regelungsstrategie des Projektpartners HAW Hamburg, beim Test der QuaMo-Fehlererkennungsmethode des Projektpartners Fraunhofer ISE und der Erprobung verschiedener WENN-DANN-Fehlerregeln im praktischen Einsatz im Rahmen dieses Projektes erfolgreich nachgewiesen werden. Die gewählten Module für die Testumgebung sind nicht in kommerziellen Produkten einsetzbar, jedoch hat die gewählte funktionale Aufteilung sich insbesondere auch bei der Analyse des Zeitverhaltens der Anwendungen sehr bewährt.

Kieback&Peter steht mit der Testumgebung eine leistungsfähige Plattform für die zukünftige Weiterentwicklung von Algorithmen und Methoden zur Verfügung.

MPC+ILC:

Im Projekt wurde von Kieback&Peter ein Teststand zur Verfügung gestellt, in der die Umsetzung eines modellprädiktiven Reglers in Kombination mit einem iterativ lernenden Verfahren realisiert und erfolgreich getestet werden konnte.

EMPC:

Die Umsetzung der modellprädiktiven Regelungsmethoden mit einer linearen Kostenfunktion konnte zunächst am Teststand für einen Heizkreis umgesetzt und validiert werden. Danach erfolgte die Umstellung auf die reale Demonstrationsanlage, die für den Einsatz eines EMPC nicht viele Optimierungsmöglichkeiten zur Verfügung stellt. Am Anfang des Projektes war zunächst geplant, dass die Demonstrationsanlage „Kieback&Peter Zentrale“ mit Pufferspeichern und weiteren thermischen Energiequellen nachgerüstet werden sollte. Damit hätten für den EMPC sehr viel bessere Optionen zur Optimierung des Energieverbrauches bestanden. Da die Nachrüstung aus organisatorischen Gründen nicht während der Projektlaufzeit durchgeführt werden konnte, musste auf die bereits bestehenden Eingriffsmöglichkeiten in die Heizungsanlage zurückgegriffen werden. Damit konnte zwar die generelle Eignung eines EMPC-Ansatzes in der Gebäudetechnik gezeigt werden, aber es konnten keine realen Einsparpotentiale nachgewiesen werden.

AMPC-SL:

Die AMPC-SL-Regelungsstrategie des Projektpartners HAW Hamburg konnte erfolgreich in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner auf dem „Demonstratormodul Regelung“ realisiert werden. Die umgesetzte Lösung erwies sich als robust genug, um in verschiedenen Testversionen im realen Anlagenbetrieb des Demonstrationsgebäudes am Beispiel eines Heizkreises erprobt zu werden.

Durch die in den Versuchen genutzte rampenförmige Referenztrajektorie geht Einsparpotenzial verloren. Die bisherigen Versuchsergebnisse zeigen kein gutes Regelverhalten, daher ist der AMPC-SL in der vorliegenden Version nicht für einen praktischen Einsatz geeignet. Allerdings zeigen die Tests, dass der Einsatz moderner modellprädiktiver Regelungen bedingt auch auf kostengünstiger Hardware für die von uns untersuchten Systeme vorberechenbar und damit realisierbar ist. Das ist ein wichtiges Projektergebnis für Kieback&Peter.

Die PI-Regelparameter (X_p , T_n) des unterlagerten Basis-Regelkreises müssen für die zukünftige Verwendung dem AMPC-Ansatz entsprechend angepasst werden. In unseren Tests sind Regelkreisschwingungen aufgetreten, die im kommerziellen Einsatz nicht akzeptabel sind.

Die Einstellung der Optimierungsparameter (q , r , s , Prädiktions- und Stellhorizont) darf im kommerziellen Einsatz dem Inbetriebnahmepersonal nicht allein überlassen bleiben. Auch ist eine experimentelle Nachjustierung wie bei den Versuchsdurchführungen im Projekt in der Praxis kaum möglich - hier müssen gut dokumentierte Einstellregeln und vor allem automatisierte Verfahren zur Einstellung und Nachführung im laufenden Betrieb gefunden werden.

Auch wenn im Projekt „OBSERVE“ mit dem MPC-Algorithmen keine quantifizierbaren Einsparungen von Heizenergie nachgewiesen werden konnten, sind diese Verfahren in Anlagen mit Energiespeichern eine der Schlüsseltechnologien der Zukunft. Die generelle Einsetzbarkeit dieser Technologien im Umfeld „Gebäudeautomation“ konnte im Projekt „OBSERVE“ nachgewiesen werden.

Fehlererkennung mit QuaMo und heuristischen Regeln:

Die vom Projektpartner Fraunhofer ISE bereitgestellten QuaMo-Modellroutinen konnten erfolgreich zum Test in der von Kieback&Peter aufgebauten Testumgebung auf dem „Demonstratormodul Fehlererkennung“ eingesetzt werden. Die zur Durchführung kontinuierlicher Anwendungstests in einem Heizkreis des Demonstrationsgebäudes Kieback&Peter-Zentrale notwendigen Implementierungsarbeiten wurden dabei in Abstimmung und Kooperation mit dem Projektpartner Fraunhofer ISE ausgeführt.

Im Rahmen verschiedener Anwendungstests konnten dabei mit der QuaMo-Methode Auffälligkeiten entdeckt werden, insbesondere wenn sich diese in einer geänderten Systemdynamik zeigten, oder die Testsituationen stark von dem zuvor anhand von Messdaten angelernten Systemverhalten abwichen.

Die von uns bei den Untersuchungen ebenfalls festgestellten Ausfälle von Messdaten können selbstverständlich als Anomalien von QuaMo erkannt werden, wenn solche Ausfälle in den Trainingsdaten von QuaMo nicht enthalten sind. In den von uns überwachten Zeiträumen sind in einigen Fällen gleichzeitig Anomalien in den Betriebszuständen und Datenausfälle aufgetreten (vgl. Kapitel 8.2.4.1.2, Beispiel 5). Die Trennung zwischen diesen beiden untersuchten Arten von Anomalien konnte aus zeitlichen Gründen in der Laufzeit vom Projekt OBSERVE nicht mehr durchgeführt werden und sollte damit Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Das von Kieback&Peter entwickelte einfache regelbasierte System zur Fehlererkennung konnte erfolgreich in der Testumgebung und in verschiedenen Anlagenbereichen des Demonstrationsgebäudes erprobt werden. Es ist daher geplant, die Regeln auch weiterhin zur Überwachung des täglichen Anlagenbetriebes des Gebäudes einzusetzen. Insbesondere ist eine Weiterentwicklung der Kombination aus trainingsdatenbasierter Fehlererkennung und der regelbasierten Fehlererkennung möglicherweise vielversprechend für einen späteren praktischen Einsatz in Kundenanlagen von Kieback&Peter. Eine entsprechende technische Weiterentwicklung vorausgesetzt, ergeben sich eventuell wirtschaftliche Vorteile für die Gebäudebetreiber.

Damit der praktische Einsatz erfolgreich erfolgen kann, muss eine Akzeptanz der Methoden insbesondere beim Betriebspersonal der Anlage aufgebaut werden. Etwaige Hürden beim Zugang zu den benötigten, „wertvollen“ Daten müssen abgebaut und Begeisterung für die nachhaltige Fehlerbehebung geweckt werden.

Dies lässt sich zum einen über einen hohen Automatisierungsgrad der Lösungen bis hin zur Durchführung selbsttätiger Korrekturmaßnahmen erreichen. Ein hoher Automatisierungsgrad ist dabei schon allein aus Gründen der zunehmenden Komplexität

der Gebäudeautomationssysteme erforderlich, eine manuelle Übersteuerung der Maßnahmen durch den Methoden-Nutzer muss jedoch jederzeit möglich sein.

Zum anderen kann die Einsatzmotivation der Verfahren über eine effiziente und vor allem übersichtliche Darstellung über Betriebszustände der Anlage erreicht werden, die als wertvolle Unterstützung bei der täglichen Betriebsführung empfunden wird. Eine wichtige Rolle spielt dabei die an der Anlagentechnik orientierte Vorauswahl von Sichten und Ergebnisdarstellungen.

Eine große Herausforderung stellt nach wie vor die angemessene Meldehäufigkeit von Fehlern dar. Die Anzahl falsch-positiver Meldungen muss dabei unbedingt klein gehalten werden, um nicht kontraproduktiv zu wirken. Das reine Bereitstellen konfigurierbarer Lösungen ist nicht ausreichend. Hier gilt es in Zukunft intelligente, anpassungsfähige Verfahren, z. B. mit Optimierungen anhand der Nutzerreaktion, zu entwickeln.

Regelbasierte Systeme werden mit steigender Systemkomplexität unübersichtlich. Dem kann – wie im Kapitel regelbasierte Fehlererkennung gezeigt - über geeignete Hierarchisierung und Visualisierungsmittel, eine Vorauswahl der zu visualisierenden Daten je nach Fehlerbild und Anlagensubsystem entgegengewirkt werden.

Bei trainingsdatenbasierten Verfahren muss die Trainingsdatenmenge geeignet vorverarbeitet und hinsichtlich der zu bearbeitenden Applikation kontinuierlich qualitätsgesichert sein. Regelbasierte Systeme können hierbei unterstützen. Ob allerdings eine rein automatisierte Datenqualitätssicherung, d. h. ohne manuelle Sichtung der Daten, tatsächlich möglich sein wird, sollte nach wie vor Gegenstand weiterer Forschungen sein.

Fazit:

Auf wissenschaftlicher Ebene konnten in „OBSERVE“ Einblicke in die jeweiligen Methoden erlangt und dadurch ein besseres Verständnis für die Implementierungsvoraussetzungen und Umsetzungsvarianten gewonnen werden, auch im Hinblick auf davon abgeleitete, zukünftige Produkte.

Eine Weiternutzung der entstandenen Testumgebungen und Demonstratoren bei Kieback&Peter für zukünftige Vorentwicklungsprojekte sowie für Ausbildungszwecke ist fest eingeplant.

Die in „OBSERVE“ gewonnenen Erkenntnisse werden in die Entwicklung von neuen Produkten eingebracht. Insbesondere im Bereich „Fehlererkennung und -diagnose“ hat das Projekt für Kieback&Peter wesentliche Beiträge geleistet, die zu einer schnelleren Entwicklung und einer besseren Qualität der Produkte führen wird.

Anhang A

Der nachfolgende Beitrag zum Arbeitspaket A.5 wurde Kieback&Peter vom Projektpartner HAW Hamburg zur Verfügung gestellt. Kieback&Peter ist weder für die inhaltliche noch für die formale Richtigkeit des Beitrages verantwortlich.

A.1 Entwicklung einer Echtzeitsimulationsumgebung auf Basis eines UDOO Entwicklungsboards und einer DDC 4200 Automationsstation

Die im Folgenden beschriebene Echtzeitsimulationsumgebung eines „UDOO Entwicklungsboards“ und einer DDC 4200 Automationsstation von Kieback&Peter wurde in der Masterarbeit „Development of a Real-Time Simulation Environment for Heating Circuits on the Basis of the UDOO developing board utilizing Scilab/Xcos“ von Patrick Kohl an der HAW Hamburg entwickelt. Die im Rahmen der Masterarbeit erstellte Dokumentation wird hier im Folgenden zusammengefasst dargestellt, (Kohl, 2015).

A.1.1 Überblick

In der Masterarbeit wurde eine Hardware in the Loop (HiL) Simulationsumgebung einer Echtzeithardwarekomponente und einer Automationsstation DDC 4200, die der HAW Hamburg von Kieback&Peter zur Verfügung gestellt wurde, entworfen. Über eine solche Umgebung ist es möglich, Hardwarekomponenten an die DDC anzubinden und deren Zusammenarbeit bereits im Labor zu testen, ohne dass die Hardware bereits an der realen Anlage implementiert werden muss. Somit können schon einige Fehler vorab behoben werden. Das Ziel ist die Prüfung der Fragestellung, ob sich eine solche Umgebung mit Low-Cost Komponenten umsetzen lässt. Hierzu wurde der Einplatinencomputer UDOO und der frei verfügbare Matlab/Simulink-Klon „Scilab/Xcos“ auf dem freien Linux Betriebssystem „Ubuntu“ verwendet. Die Wahl fiel hier auf diese Komponenten, da es sich beim UDOO um einen sehr leistungsstarken Einplatinencomputer mit hoher Flexibilität und vielfältigen Einsatzbereichen handelt. Zudem ist er aufgrund seines geringen Preises wirtschaftlich attraktiv. Als Simulationsumgebung wurde hier nicht auf das kostenintensive Programm Matlab/Simulink gesetzt, sondern die freie Software Scilab/Xcos gewählt, um eine Testumgebung zu entwickeln die nur mit geringen Kosten verbunden ist.

Der Betrieb von einem UDOO und der DDC soll in einer Testumgebung als HiL Aufbau durchgeführt werden. Dabei übernimmt die DDC die Aufgabe des Reglers. Über den UDOO erfolgt die Anbindung eines Computers, der mit Hilfe eines Modells eine Heizungsanlage simuliert. Diese simulierte Anlage soll von der DDC geregelt werden. Um dies zu realisieren, müssen Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten umgesetzt werden. Zwischen der DDC und dem UDOO soll die Kommunikation über analoge Signale erfolgen. Der Computer und der UDOO sind über eine serielle Kommunikation miteinander verbunden. Die verschiedenen Komponenten sowie deren Verschaltung sind in der Abbildung A.1.1-1-angegeben.

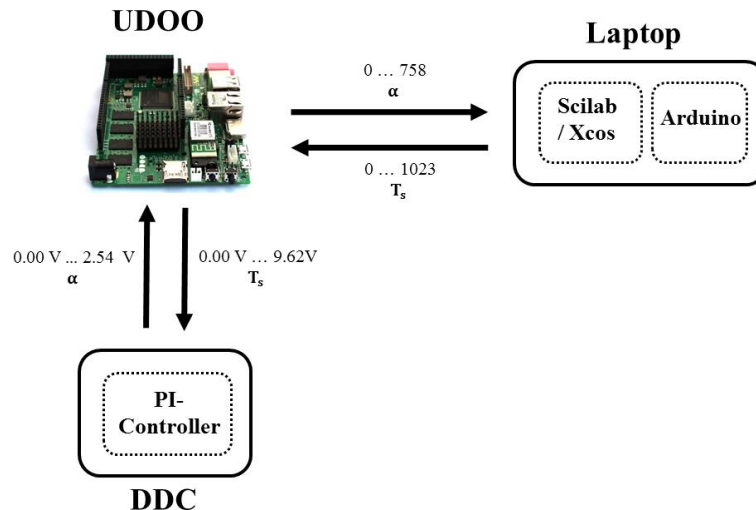


Abbildung A.1.1-1 Schema der HiL Umgebung mit der DDC, dem UD00 und dem Laptop, (Kohl, 2015), (UD00)

A.1.2 Komponenten des Regelkreises

In diesem Kapitel erfolgt die Vorstellung der einzelnen verwendeten Komponenten des Regelkreises, der sich aus der Regelstrecke und dem Regler zusammensetzt.

Heizungsmodell

Der Laptop simuliert das Verhalten einer Heizungsanlage. Ein einfaches Anlagenmodell, das aus (Pangalos, Eichler, & Lichtenberg, 2014) bekannt ist, wird hier verwendet. Es setzt sich aus Komponenten der Matlab Heatlib zusammen, die hier jedoch in Scilab implementiert wurden, (Kruppa, 2014). Ein Schema des Modells ist in der Abbildung dargestellt. In dem Beispielmmodell versorgt ein Kessel einen Verbraucher mit einer Vorlauftemperatur T_s . Abgekühltes Wasser gelangt über den Rücklauf mit der Temperatur T_r zurück in den Kessel. Der Kessel erwärmt das Wasser. Die Leistung des Brenners kann über ein Modulationssignal α eingestellt werden. Eine Pumpe sorgt für die Zirkulation des Wassers im Kreis und stellt einen Volumenstrom $\dot{V}$ ein. Über die Pumpe wird außerdem das Verhalten der Thermostatventile abgebildet. Der Verbraucher stellt ein Gebäude dar, das mit statischen Heizkörpern versorgt wird. Alle Räume des Gebäudes werden zu einem großen Raum, d.h. einer Zone, zusammengefasst. So ergibt sich ein Einzonenmodell mit der Annahme, dass die Luft perfekt durchmischt und überall auf der gleichen Temperatur T_b ist. Die Störgröße, die berücksichtigt wird, ist die Außentemperatur T_a . Die Parameter dieses Modells wurden mit Messdaten aus der Bezirksregierung Düsseldorf identifiziert, wie in (Pangalos, Eichler, & Lichtenberg, 2014) eingeführt. Hier erfolgt die Umsetzung in Scilab/Xcos.

PI Regler

Die DDC 4200 übernimmt die Regelungsaufgabe in dem HiL Regelkreis. Da der Fokus hier auf dem Aufbau und Test der HiL Umgebung liegt, wird ein einfacher und bekannter Regler verwendet, um möglichst wenig Fehlerquellen hinzuzufügen. Daher wurde ein Standard PI Regler gewählt, der auf der DDC projiziert wurde. Das Ziel ist die Regelung der Sollvorlauftemperatur des Kessels. Über den PI Regler soll eine

konstante Vorlauftemperatur eingestellt werden. Der Referenzwert $T_{s,ref}$ wird als Reglerparameter übergeben. Der PI Regler stellt das Modulationssignal des Kessels so ein, dass die Sollvorlauftemperatur diesen Referenzwert erreicht. Der Regelkreis ist in der Abbildung A.1.2-1 schematisch dargestellt.

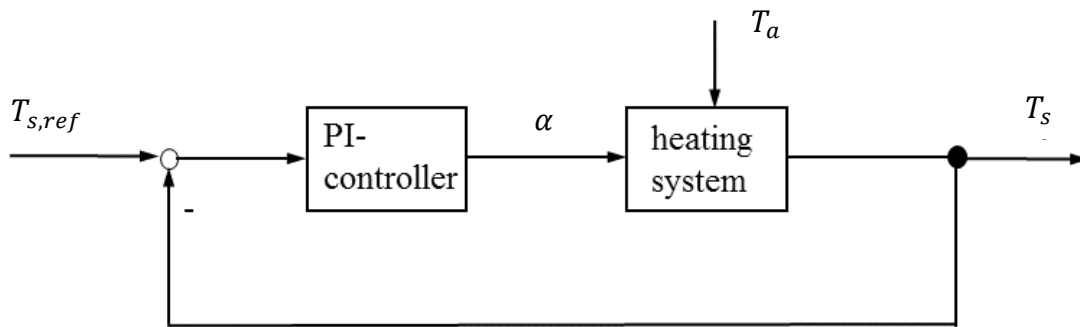


Abbildung A.1.2-1: Schematische Darstellung des Regelkreises, (Kohl, 2015)

Zur besseren Übersicht zeigt die Abbildung A.1.2-2, die einzelnen Komponenten der Testumgebung und ordnet sie der jeweiligen Hardware zu. Das Modell mit dem Kessel und dem Verbraucher ist in Xcos auf dem Laptop implementiert und übermittelt die aktuelle Vorlauftemperatur an den PI Regler, der auf der DDC projiziert wurde. Der PI Regler bestimmt das Stellsignal des Kessels, welches daraufhin an das Anlagenmodell auf dem Laptop kommuniziert wird.

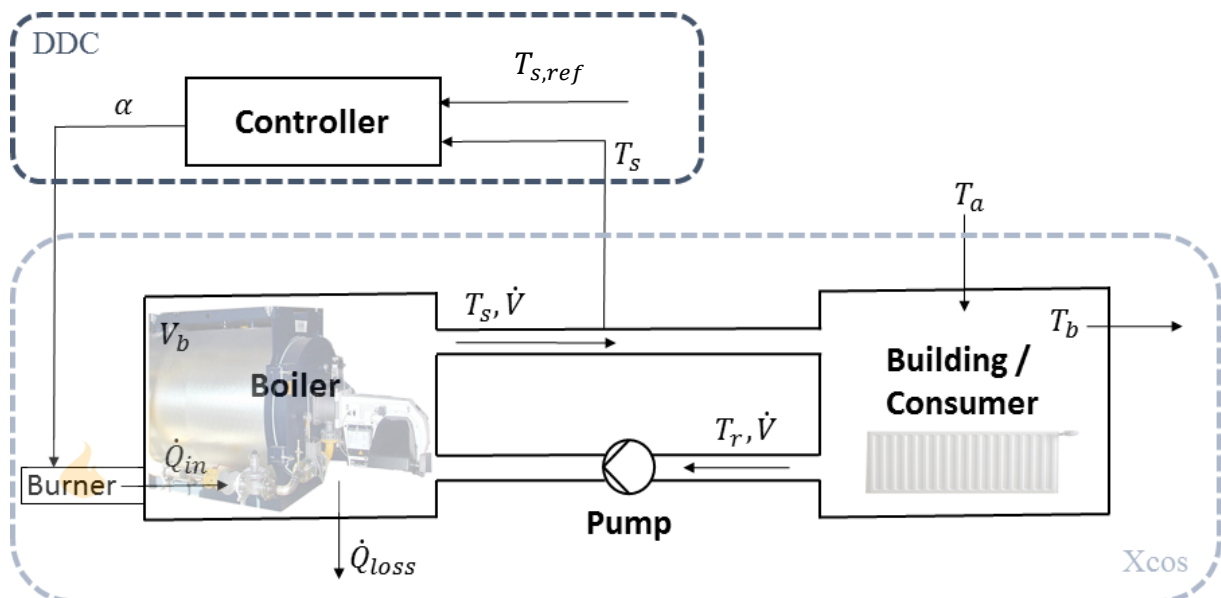


Abbildung A.1.2-2: Schema des Modells und des Reglers und ihren Implementierungen, (Kohl, 2015)
(Foto: www.wikimedia.org)

A.1.3 Verwendete Hard- und Software

Der UDOO, die DDC und die auf dem Laptop verwendete Software werden im Folgenden kurz eingeführt.

UDOO

Der UDOO ist ein Einplatinencomputer mit 2 Prozessoren, der in vielen prototypischen Projekten verwendet wird, (UDOO). Zum einen beinhaltet der UDOO einen Freescale i.MX6 ARM Cortex-A9 Quad Core 1 GHz Prozessor. Auf diesem Prozessor läuft das Linux Betriebssystem Ubuntu. Weitere Anwendung wie z.B. Scilab/Xcos oder die Arduino IDE können hier installiert werden. Der zweite Prozessor ist der ATMEEL SAM3x ARM Prozessor. Dieser entspricht einem Arduino Due und ermöglicht den Datentransfer z.B. über die GPIO (General purpose input/output) Pins. Der UDOO hat 76 GPIO Pins, die für die analoge und digitale Kommunikation frei konfiguriert werden können. Die Pins arbeiten mit 3.3V. Maximal sind Spannungen von 3.445V möglich, ohne dass es zu Schäden kommt. Von diesen GPIO Pins sind 8 mit einem ADC (analog to digital converter) und 2 mit einem DAC (digital to analog converter) ausgestattet, (Bernstein, 2015). Aufgrund der Architektur kann das Ausgangssignal des DAC's Spannungen von 0.571V bis 2.87V annehmen. Zwischen den Prozessoren erfolgt eine serielle Kommunikation über eine UART-Schnittstelle. Somit können Daten zwischen den Prozessoren ausgetauscht werden. Damit wäre es z.B. möglich aus Xcos heraus auf dem i.MX6 Prozessor auf die serielle Schnittstelle zu schreiben und diese Daten daraufhin mit dem SAM3x an einen GPIO Pin zu schreiben, um sie an die Peripherie zu kommunizieren. Da sich herausgestellt hat, dass Scilab teilweise unzuverlässig auf dem i.MX6 läuft, wurde hier im Weiteren nur der SAM3x verwendet und ein Laptop über die serielle Schnittstelle an den SAM3x angeschlossen. Auf dem Laptop läuft Scilab deutlich stabiler und übernimmt somit hier die Rolle des Anlagensimulators. Mit weiterer Entwicklung von Scilab und dem UDOO wäre es auch denkbar, das Programm direkt auf dem UDOO, d.h. dem i.MX6 laufen zu lassen. Hier wurde aufgrund zusätzlicher Fehlerquellen jedoch davon abgesehen. Der Laptop wird über die USB Schnittstelle des UDOO angeschlossen. Darüber hinaus hat der UDOO noch einige weitere Schnittstellen, wie Ethernet, RJ 45 oder HDMI, die hier jedoch nicht verwendet werden.

DDC

Es wurde eine DDC 4200 verwendet, die der HAW Hamburg von Kieback&Peter zur Verfügung gestellt wurde. Dabei handelt es sich um eine Automationsstation für die Anwendung in Gebäuden. Die Kommunikation in Gebäuden erfolgt häufig über das BACnet Protokoll. Hier werden jedoch die I/O Pins, die an der DDC zur Verfügung stehen, benutzt, um eine Kommunikation über analoge Signale zu ermöglichen. Dazu dienen 2 Pins, einer als Eingang des Reglers für das Messsignal der Vorlauftemperatur, ein zweiter als Ausgang für das vom Regler bestimmte Modulationssignal. Die Pins arbeiten in einem Spannungsbereich von 0V bis 10V. Der Eingang der DDC wurde so eingestellt, dass der Spannungsbereich als Temperatur von 0°C bis 100°C interpretiert wurde. Auf der DDC steht ein PI Regler zur Verfügung, der für die entsprechende Anwendung mit den analogen Pins als Ein- und Ausgang projiziert wurde.

Software

Auf dem Laptop wurden hauptsächlich zwei Programme verwendet. Für die Programmierung des SAM3x ist die Arduino IDE (integrated development environment) nötig, (Arduino). Dies ist eine Programmierumgebung für den SAM3x, der sich wie ein Arduino programmieren lässt, (Bernstein, 2015). Somit lassen sich Skripte auf dem Laptop erstellen, die dann auf den SAM3x geladen und dort ausgeführt werden. Hierbei wird eine spezielle Programmiersprache verwendet, die an C angelehnt ist. Der typische Programmaufbau enthält zunächst eine Initialisierungsfunktion, in der z.B. festgelegt wird, welche Pins in welcher Funktion, d.h. als Ein- oder Ausgang, verwendet werden sollen. Darauf folgt eine Dauerschleife mit den Anweisungen, die während des Betriebes, wie das Lesen oder Schreiben der Pins, ausgeführt werden sollen, (Schmidt, 2015).

Die Modellierung und die Simulation des Modells der Heizungsanlage erfolgt mit dem frei verfügbaren Matlab/Simulink Klon Scilab/Xcos, (INRIA). Das Modell der Heizungsanlage wurde in Xcos implementiert und simuliert. Es ist in Xcos möglich Simulationen in Quasi-Echtzeit auszuführen. Zudem kann mit der zusätzlichen frei verfügbaren „Serial Communication Toolbox“ eine serielle Kommunikation durchgeführt werden. Damit kann die serielle Schnittstelle aus Xcos heraus gelesen und geschrieben werden, was die Kommunikation mit dem UDOO ermöglicht.

A.1.4 Kommunikationsschnittstellen

Die Kommunikation zwischen der DDC und dem UDOO erfolgt durch analoge Signale. Die DDC arbeitet hier mit Spannungen bis 10V während der UDOO nur Spannungen bis 3.3V erlaubt. Somit muss eine elektrische Schnittstelle zwischen den Komponenten implementiert werden, um die Pegel anzupassen. Die Abbildung A.1.4-1 zeigt den UDOO mit den vor- und nachgelagerten Schaltungen für die Anpassung der Pegel.

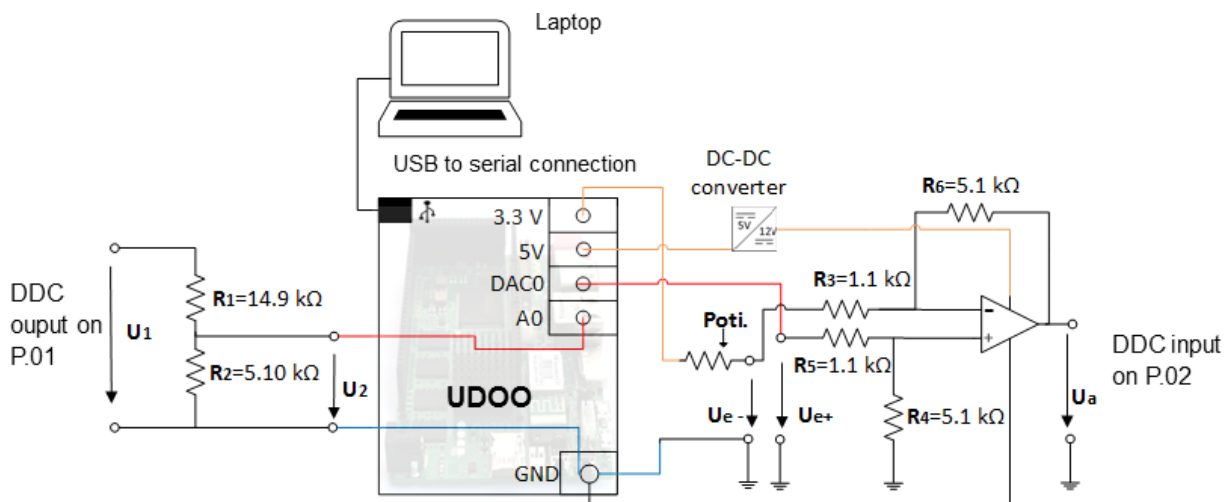


Abbildung A.1.4-1: Anschlüsse des UDOO an die elektronischen Schnittstellenkreise, (Kohl, 2015)

Auf der Eingangsseite muss die Spannung von 0V bis 10V des Signals, das von der DDC kommt, reduziert werden, damit der UDOO keinen Schaden nimmt. Dies geschieht über einen Spannungsteiler.

Für das Ausgangssignal des UDOO wird einer der DACs verwendet, über den eine analoge Ausgangsspannung zwischen 0.57V und 2.87V realisiert werden kann. Um mit diesem Bereich einen möglichst großen Eingangsbereich der DDC nutzen zu können, muss das Signal des UDOO verstärkt werden. Dies erfolgt über einen Differenzverstärker, der mit einem Operationsverstärker implementiert wurde, wie in Abbildung A.1.4-2 dargestellt, (Tkotz & Bastian, 2006).

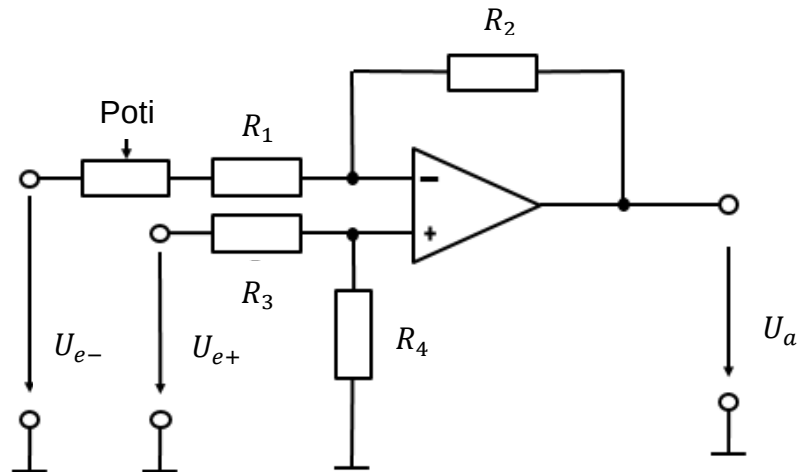


Abbildung A.1.4-2: Differenzverstärker, (Kohl, 2015)

Die Ausgangsspannung U_a berechnet sich aus den Eingangsspannungen U_{e+} und U_{e-} und den Werten der Widerstände durch

$$U_a = \frac{(R_3 + R_6)R_4}{(R_5 + R_4)R_3} U_{e+} - \frac{R_6}{R_3} U_{e-} .$$

Die Gleichung vereinfacht sich durch die Wahl der Widerstände $R_3 = R_5$ und $R_4 = R_6$ zu

$$U_a = \frac{R_6}{R_3} (U_{e+} - U_{e-}).$$

Über das Potentiometer lässt sich die Spannung $U_{e-} = 0.57V$ genauso so wählen, dass der Offset des DAC Ausgangs des UDOOs kompensiert wird. Über die Widerstände kann der gewünschte Verstärkungsfaktor eingestellt werden. Mit den Widerständen $R_3 = R_5 = 1.1k\Omega$ und $R_4 = R_6 = 4.7k\Omega$ konnte so in der realen Umsetzung eine maximale Ausgangsspannung von 9.62V erreicht werden, was gut in den Spannungsbereich der DDC passt. Dies entspricht nicht ganz dem theoretisch zu erwartenden Wert, was z.B. darauf zurückzuführen ist, dass sich die elektronischen Bauteile nicht wie angenommen ideal verhalten, sondern z.B. zusätzliche Verluste auftreten. Die prototypische Implementierung zeigt die Abbildung A.1.4-3.

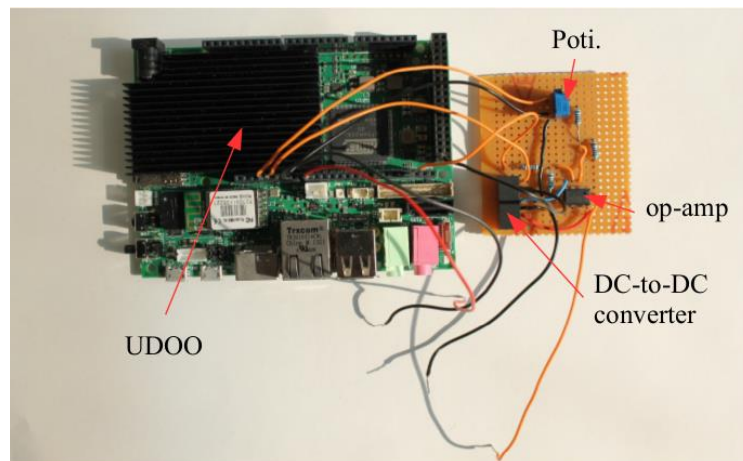


Abbildung A.1.4-3: Implementierung des Differenzverstärkers und Anschluss an den UDOO, (Kohl, 2015)

A.1.5 Simulationsergebnisse

Um die entwickelte Umgebung zu testen, wurden die einzelnen Komponenten wie beschrieben miteinander verbunden. Für die Simulation wurde der PI Regler mit festen Werten für die Verstärkung und die Nachstellzeit parametrisiert. Als Testszenario startet der Kessel bei einer Temperatur von 65°C . Der Referenzwert der Vorlauftemperatur wird auf 67.5°C festgelegt. Der PI Regler soll das Modulationssignal nun so einstellen, dass die Vorlauftemperatur die gewünschte Referenz erreicht. Dazu wurden mehrere Testläufe über einen Zeitraum von jeweils fünf Minuten durchgeführt. Bei Tests über einen längeren Zeitraum traten teilweise Kommunikationsprobleme auf, was zu einem Fehlverhalten führte. Die Ergebnisse von vier Experimenten sind in der Abbildung A.1.5-1 gezeigt.

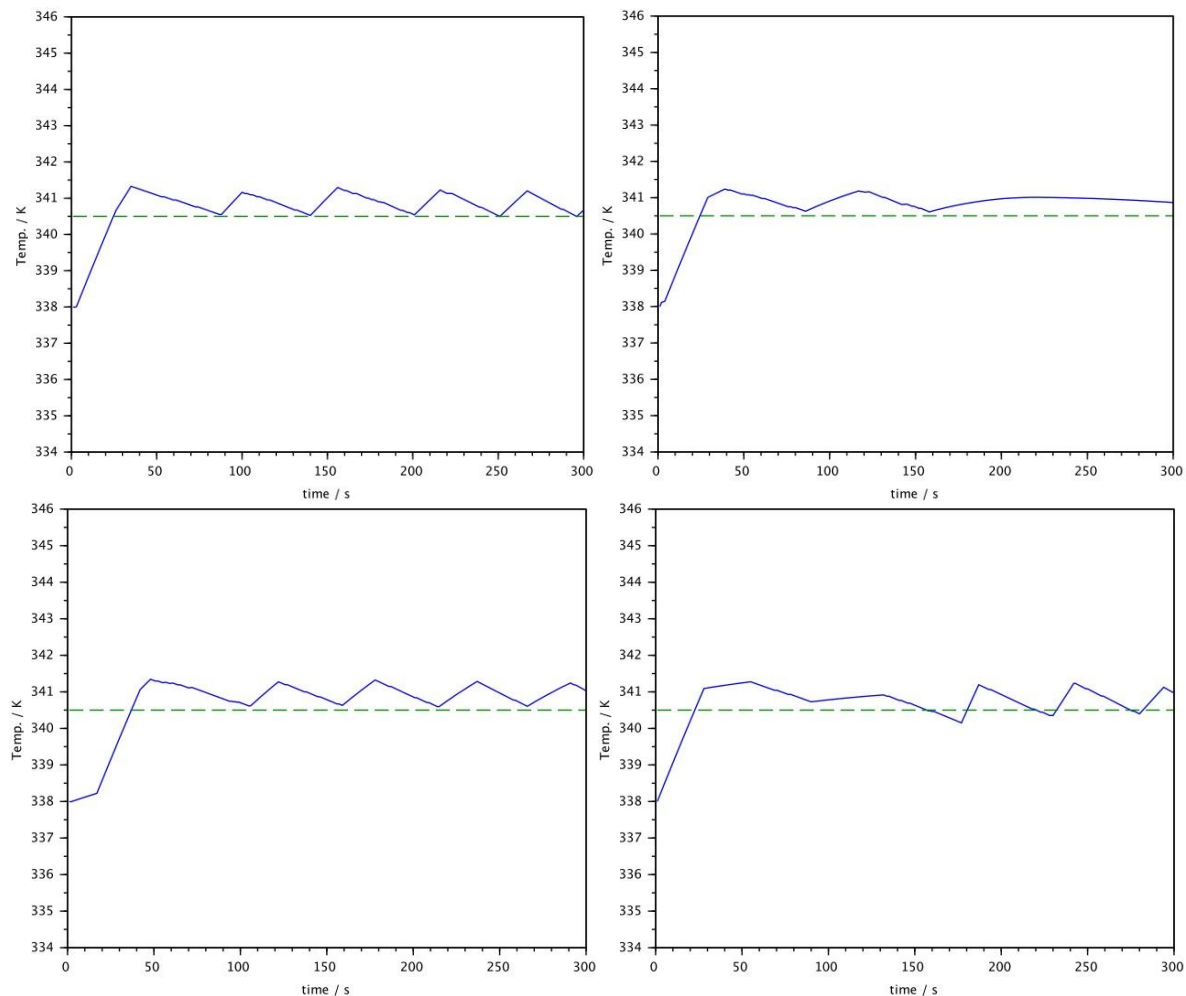


Abbildung A.1.5-1: Ergebnisse von vier Experimenten im geschlossenen Kreis über jeweils 5 Minuten (blau: Vorlauftemperatur, grün gestrichelt: Referenzwert), (Kohl, 2015)

Es wird deutlich, dass in diesem Zeitraum eine Kommunikation zwischen den Komponenten stattgefunden hat und der Regler die Vorlauftemperatur erhöht hat. Der Sollwert wird allerdings nicht genau erreicht. Es bleibt eine gewisse Regelabweichung. Zudem ist zu erkennen, dass sich bei verschiedenen Experimenten trotz gleicher Ausgangsbedingungen verschiedene Regelungsergebnisse einstellen. Mögliche Gründe dafür könnten eine fehlende Synchronisation zwischen dem Xcos Modell der Heizungsanlage und der DDC sein. Zudem ist es möglich, dass eine zusätzliche Verzögerung bei der Umsetzung der seriellen Kommunikation über die USB Schnittstelle auftritt, (Weichinger). Des Weiteren können Fehler in der Implementierung oder in der Ausführung von Scilab nicht ausgeschlossen werden, da dies nicht dauerhaft zuverlässig arbeitete. Auch auf der UDOO Plattform kam es des Öfteren zu nicht reproduzierbaren Fehlern. Somit lässt sich abschließend sagen, dass in dieser Arbeit eine HiL Umgebung mit einem Laptop einem UDOO und einer DDC aufgebaut wurde. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten wurde etabliert und Schnittstellen implementiert. Allerdings zeigte sich im Betrieb, dass die Umgebung noch keine ausreichende Zuverlässigkeit aufweist, um diese wirklich einsetzen zu können. Die Anwendung eines Einplatinencomputer zeigt sich jedoch als sinnvolle Implementierungsplattform. Daher wurde im weiteren Projektverlauf weiterhin für die

Implementierung ein solcher Computer als Implementierungsvariante verwendet. Aufgrund der Erfahrungen mit dem UDOO wurde jedoch die Plattform gewechselt. Hierbei fiel die Wahl daraufhin auf einen Raspberry Pi, der sich schon in vielfältigen prototypischen Anwendungen in der Forschung und Industrie als zuverlässige Hardwareplattform erwiesen hat.

A.2 Literaturverzeichnis zum Anhang A

- Arduino. (kein Datum). *Offizielle Webseite*. Abgerufen am 31. 05. 2015 von <http://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>
- Bernstein, H. (2015). *Grundlagen der Hard- und Software der Mikrocontroller ATtiny2313, ATtiny26 und ATmega32*. Wiesbaden: Springer.
- INRIA. (kein Datum). *Scilab offizielle Webseite*. Abgerufen am 31. 05. 2015 von <http://www.scilab.org/resources/documentation>
- Kohl, P. (2015). *Development of a Real-Time Simulation Environment for Heating Circuits on the Basis of the UDOO developing board utilizing Scilab/Xcos*. Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Sciences.
- Kruppa, K. (2014). *Dokumentation Matlab HeatLib - Zur Verwendung mit Matlab*. Dokumentation, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Sciences.
- Pangalos, G., Eichler, A., & Lichtenberg, G. (2014). Hybrid Multilinear Modeling and Applications. In *Advances in Intelligent and Soft Computing* (S. 71-85). Springer International Publishing.
- Schmidt, M. (2015). *Arduino - Ein schneller Einstieg in die Microcontroller-Entwicklung*. Heidelberg: dpunkt Verlag.
- Tkotz, K., & Bastian, P. (2006). *Fachkunde Elektrotechnik*. Norney: Europa-Lehrmittel.
- UDOO. (kein Datum). *Offizielle Webseite*. Abgerufen am 31. 05. 2015 von <http://udoo.org>
- Weichinger, K. (kein Datum). *Scicos Serial-Interface-Block Manual V12.05*. Abgerufen am 31. 05. 2015 von www.bioe.at.tt