

Prädiktiver Betrieb von thermisch aktiven Bauteilsystemen (TABS)

Prof. Dipl.-Ing. Elmar Bollin

Fakultät Maschinenbau und
Verfahrenstechnik (M+V),
Leiter der Forschungsgruppe net –
Nachhaltige Energietechnik
an der Hochschule Offenburg

Badstraße 24, 77652 Offenburg
Tel.: 0781 205-126
E-Mail: bollin@hs-offenburg.de

1954: Geboren in Lörrach
Studium Maschinenbau an der Technischen Hochschule Karlsruhe
1981: Abschlussdiplom
1982–92: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut
für Solare Energiesysteme Freiburg
Seit 1993: Professur an der Hochschule Offenburg
Seit 2000: Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF)
der Hochschule Offenburg



Lehrgebiete: Solartechnik, Regelungstechnik, Gebäudeautomation
Forschungsgebiete: Solarthermische Großanlagen, Photovoltaische
Inselversorgung, Energiemanagement in Gebäuden

3.4 Prädiktiver Betrieb von thermisch aktiven Bauteilsystemen (TABS)

Prof. Dipl.-Ing. Elmar Bollin
Dipl.-Ing. Thomas Feldmann

Abstract

Due to their high inertia, the control of Thermal Activated Building Systems (TABS) is difficult to handle. A concrete core conditioning system has a typical time constant of 15 hours. Therefore TABS are operated normally 24 hours a day or at least the whole night with moderate inlet temperatures near the desired room temperatures. The inlet temperature is calculated depending on the mean value of the ambient temperature which leads to long times when the system runs with minimal difference between inlets and return temperature.

If the amount of energy needed for the next day would be known, be it for cooling or heating, the TABS could be charged with the highest or lowest possible inlet temperature and therefore shortest possible operation time of the pumps. The ceiling would then be used as energy storage. To make a prediction of the upcoming energy demand, a simple model is needed, which calculates the energy demand as a function of weather forecast and scheduled use of the building.

Such a model was generated for the new building of Elektror Airsystems in Filderstadt making hundreds of calculations using a detailed thermal model of the building. After further tests with the Simulation Program TRNSYS it was implemented in the real Building Automation System.

This Building Automation System receives weather forecasts by calling the webservice of a weather service provider. Ambient temperature and solar radiation are used to calculate the energy demand of the next day. The energy is stored in the ceilings equally distributed over the whole day by operating the pumps in a pulse width modulated mode. The results of summer 2009 were very satisfying concerning energy demand and comfort with a decrease of system operation time of 70 %.

TABS – eine Erfolgsgeschichte

In Verwaltungs- und Gewerbebauten werden immer häufiger thermoaktive Bauteilsysteme, kurz „TABS“, zur Temperierung des Gebäudes eingesetzt. Hierbei werden Teile der Gebäudestruktur, meist die Geschossdecken, mit bauteilintegrierten Rohrregistern gekühlt oder beheizt. Dadurch ergibt sich eine energieeffiziente und nachhaltige Systemlösung, die einen kostengünstigen Betrieb bei hohem Komfort ermöglicht. Sie ist auch ideal für den Einsatz regenerativer Energie aus Erdreich, Grundwasser und Außenluft geeignet.

Die Geschossdecken werden mit Wärme- oder Kälteenergie beladen, indem warmes oder kaltes Wasser mit Temperaturen nahe der gewünschten Raumtemperatur durch die im Bauteil integrierten Rohrregister zirkuliert. Die Vorlauftemperaturen variieren zumeist zwischen 17 °C und 28 °C. Die Energiezufuhr kann durch Variation von Vorlauftemperatur, Massenstrom und Ladezeit gesteuert werden.

Die große Wärme übertragende Fläche der Decke macht es möglich, schon bei geringen Über- bzw. Untertemperaturen ausreichend Leistung an den Raum zu übertragen. Sie erfolgt zu 60 % über Strahlung und zu 40 % über Konvektion.

Wegen der großen Systemträgheit ist jedoch eine schnelle Temperaturregelung nicht möglich. Die Entladung findet ohne direkte Einflussmöglichkeit des Raumnutzers völlig passiv statt. Da der benötigte Wärme- bzw. Kältebedarf eines Raums aber nicht exakt vorhersehbar ist, kommt es systembedingt zu Ladereserven und damit zu einem erhöhten Energieeinsatz.

Regelungstechnische Herausforderung und Konsequenzen für die Praxis

Durch die große Trägheit von TABS mit Verzögerungszeiten von mehreren Stunden ist eine Regelung der Gebäudetemperatur mit TABS als Stellglied durch klassische Regelalgorithmen nicht realisierbar. In der Praxis werden solche Systeme daher nicht geregelt, sondern ohne Berücksichtigung des Raumzustands gesteuert. Meist wird der gleitende Mittelwert der Außentemperatur über 24 Stunden als Referenzgröße genommen, nach der dann mit einer Heiz- und einer Kühlkurve die Vorlauftemperatur des TABS-Kreislaufs bestimmt wird. Zwischen den Betriebsarten Kühlen und Heizen liegt ein Totband, in dem die Anlage außer Betrieb genommen wird. Die Pumpe wird im Dauerbetrieb mit konstanter Drehzahl betrieben. Sie läuft auch dann, wenn keine Wärme oder Kälte abgenommen wird, die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf der TABS also gleich oder nahe null ist.

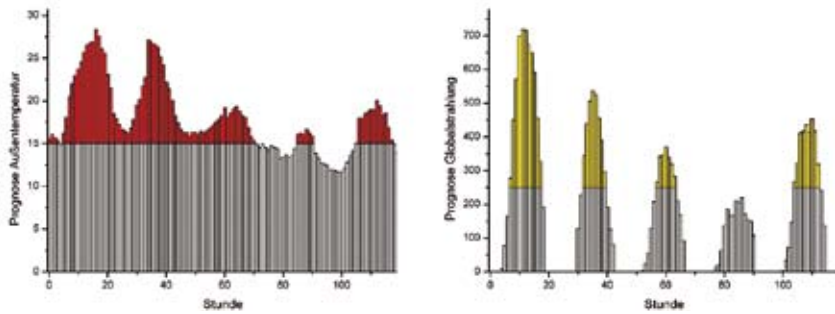


Abb. 3.4-1: Prinzip der Bestimmung von Temperatur- und Strahlungslastsummen

Das System ist bei dieser Betriebsweise relativ gutmütig zu betreiben, da die Betriebstemperaturen immer nahe der gewünschten Raumtemperatur liegen. Bei plötzlichen Temperaturwechseln kann es jedoch aufgrund der Trägheit des Systems zu Komforteinbußen kommen und auch der Energiebedarf bietet aufgrund der hohen Pumpenlaufzeiten noch Optimierungspotenzial. Die aufmerksame Begleitung der Anlage durch geschultes Personal ist erforderlich, bis die Parameter so eingestellt sind, dass die Nutzer mit den Raumtemperaturen zufrieden sind. Es vergeht in der Praxis ein ganzes Jahr, weil das Verhalten in den verschiedenen Jahreszeiten angepasst werden muss. Fehlen in einem Sommer oder Winter extreme Temperaturen, ist sogar noch längere beobachtende und justierende Begleitung notwendig.

Der größte Nachteil sind die häufig auftretenden Betriebszustände der Anlage, in denen vom TABS praktisch keine Energie abgenommen wird, die Pumpen jedoch trotzdem weiterlaufen. Hier wäre es besser, wenn bei geringer Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf abgeschaltet werden würde. Da sich bei Anlagenstillstand die Temperaturspreizung nicht sinnvoll messen lässt, muss die Anlage dann jedoch in regelmäßigen Abständen für eine gewisse Zeit wieder in Betrieb genommen werden, um feststellen zu können, ob die Betondecken wieder Kälte oder Wärme abnehmen können.

Prädiktives Betriebskonzept

Ein ganz anderer Ansatz wurde im Rahmen des Projekts „Simulationsgestützte Automation für die nachhaltige sommerliche Klimatisierung von Gebäuden“ verfolgt. Es ist Bestandteil des Förderprogramms „Klimazwei“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Um die Pumpenlaufzeiten zu minimieren, sollte die Anlage möglichst effektiv arbeiten. Die Menge an Energie, die pro Zeiteinheit im Kühlbetrieb den Decken entzogen oder im Heizbetrieb in die Decken eingebracht wird, soll maximal sein. Dies wird erreicht, indem mit konstanten minimal beziehungsweise maximal möglichen Temperaturen gefahren wird. Dies führt zwangsläufig zu maximalen Temperaturspreizungen und damit zu maximaler Effektivität, bezogen auf die Pumpenlaufzeit. Die Energiemenge wird allein über die Laufzeit der Anlage gesteuert und nicht über die Variation der Vorlauftemperatur. Es wurde dem Thema des Projekts entsprechend lediglich der Kühlbetrieb betrachtet, die Ergebnisse lassen sich jedoch auch auf den Heizbetrieb übertragen.

Da die Beladung der Bauteile erst nach Stunden ihre Wirkung zeigt, muss sehr sorgfältig und überlegt vorgegangen werden. Die entscheidende Frage ist, wie viel Energie den TABS in einer Kühlphase entzogen werden muss, damit das Gebäude in den folgenden Stunden die Komfortbedingungen nicht verletzt. Ein schnelles Gegensteuern ist mit solch einem trägen System nicht möglich. Angenommen, es wurde zu wenig gekühlt, wird es spätestens in den Nachmittagsstunden zu Übertemperaturen in exponierten Räumen kommen. Jetzt ist es jedoch zu spät, um die Pumpen erneut zu starten, denn bis der Kühleffekt im Raum ankommt, dauert es viele Stunden.

Bestimmung des Kühlbedarfs

Entscheidend für das Funktionieren des oben beschriebenen Regelkonzepts ist die zuverlässige Vorhersage des Kühlbedarfs, der notwendig ist, um die Raumtemperaturen unterhalb einer Grenze von 26°C zu halten. Denkbar wäre es, diesen durch eine betriebsbegleitende Simulation mit einem aufwendigen Ge-

bäudemodell in TRNSYS und einer Wetterprognose zu bestimmen. Der erforderliche Aufwand, der für ein zuverlässiges Funktionieren notwendig ist, überschreitet jedoch das vertretbare Maß erheblich. Es gilt also einen einfachen Algorithmus zu finden, mit dem der Kühlbedarf des kommenden Tags hinreichend genau bestimmt werden kann.

Die wichtigsten Einflussgrößen auf den Kühlbedarf sind die Außentemperatur, die solare Einstrahlung sowie die inneren Lasten durch Menschen und Geräte. Um die Frage beantworten zu können, wie die Temperatur- und Strahlungsdaten mit dem Kühlbedarf des Gebäudes zusammenhängen, sind umfangreiche TRNSYS-Simulationsrechnungen mit dem Meteororm Standardwetterdatensatz für Stuttgart durchgeführt worden.

Bewertung der Wetterprognose

Als Maß für den Einfluss der Außentemperatur wurde die prognostizierte Überschreitung einer bestimmten Grenztemperatur tageweise summiert. Dasselbe wird für die Globalstrahlung gemacht wie in Abbildung 3.4-1 dargestellt. Als Ergebnis erhält man für jeden der kommenden fünf Tage die Lastsummen sowohl für die Außentemperatur als auch für die Globalstrahlung. Diese Lastsummen sind für die Aufheizung des Gebäudes relevante Größen. Der Einfluss der inneren Lasten ist für Arbeitstage und Wochenenden jeweils nahezu konstant – mit Ausnahme der Beleuchtung, die sich allerdings in der Sommerperiode so gut wie nicht auswirkt.

Vereinfachtes Modell

Das Ergebnis eines solchen Simulationslaufs ist in Abbildung 3.4-2 dargestellt. Trägt man die durch die Simulation bestimmte Kältemenge über die Temperatur-Lastsummen (Abb. 3.4-1 links) auf, erhält man eine relativ weit gestreute Punktwolke, die schon einen gewissen linearen Zusammenhang erkennen lässt. Werden jedoch die Punkte entsprechend der Strahlungs-Lastsummen (Abb. 3.4-1 rechts) eingefärbt, werden die Verhältnisse eindeutiger. Aus der Kombination von Temperatur- und Strahlungs-Lastsummen lässt sich die notwendige Kältemenge anhand des Kennfelds ziemlich genau bestimmen. In der Praxis kann man, ausgehend von einer Regressionsgeraden, Korrekturen für die Strahlung anbringen und erhält so die für den kommenden Tag notwendige Kältemenge.

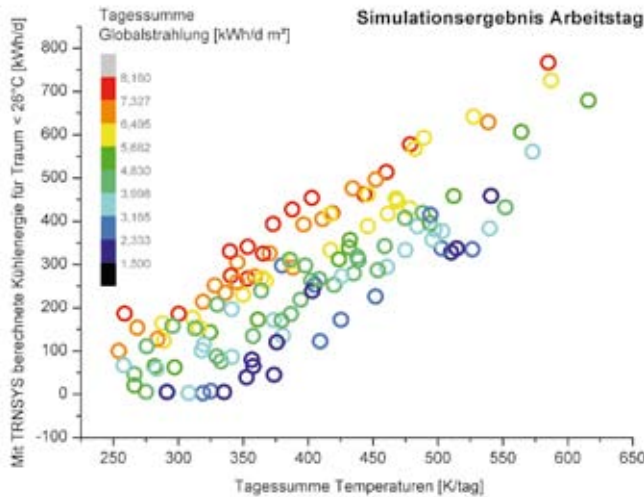


Abb. 3.4-2: Abhängigkeit der notwendigen Kühlenergie von Temperatur und Globalstrahlung

Dosierung der Energiemenge

Um die in die TABS eingebrachte Kältemenge exakt dosieren zu können, muss während des Betriebs mitgerechnet oder ein Wärmemengenzähler ausgelesen und beobachtet werden. Dies ist jedoch vor allem im Fall des Betriebs mit Pulsweitenmodulation (PWM-Betrieb) nicht ganz einfach und erfordert zudem eine sehr genaue messtechnische Ausrüstung der Anlage. Da diese im Falle des Neubaus Elektror nicht vorhanden war und auch die Datenerfassung zu Beginn der Testphase nicht zuverlässig funktionierte, wurde mithilfe der TRNSYS-Simulation untersucht, ob die Summierung der Energiemenge online durch eine reine Zeitsteuerung der Pumpen ersetzt werden kann. In Abbildung 3.4-3 ist der Zusammenhang zwischen Laufzeit der Pumpe und der transportierten Energiemenge zu sehen.

Aufgrund des geringen Fehlers, der sich ergibt, wenn die Energiemenge nicht mitgerechnet, sondern lediglich die Laufzeit der Pumpe für die Dosierung herangezogen wird, wurde für die praktische Umsetzung in der Steuerung des Gebäudes Elektror auf die Auswertung des Wärmemengenzählers verzichtet. Der Fehler, der auftreten kann, liegt unterhalb der Messgenauigkeit von üblichen Wärmemengenzählern. In den Simulationsrechnungen wurde daher ebenfalls nicht mitgerechnet, sondern nach Pumpenlaufzeit dosiert.

Abbildung 3.4-3 - Abhängigkeit der transportierten Energie von der Pumpenlaufzeit auf Basis von Simulationsrechnungen

in TRNSYS wurden zwei mögliche Varianten der Pumpensteuerung genauer untersucht. Zum einen der ununterbrochene Betrieb vorzugsweise in den Nachtstunden, zum anderen die gleichmäßige Aufteilung der erforderlichen Laufzeit über 24 Stunden durch Pulsweitenmodulationsbetrieb der Pumpen.

Betrieb vorzugsweise in den Nachtstunden

Der ununterbrochene Betrieb vorzugsweise in den Nachtstunden macht sich die Speicherfähigkeit von Betondecken zunutze. Der Kältespeicher Betondecke wird während der Nachtstunden beladen und erwärmt sich im Lauf des Tages durch die in die Räume eingebrachten inneren und äußeren thermischen Lasten. Die Beladung muss so dosiert werden, dass die Räume weder am Morgen zu kalt, noch am Nachmittag zu warm werden. Eine Nachkühlung während des Tages, um Fehler zu korrigieren ist nicht möglich. Sie wäre aufgrund der großen Trägheit des Systems wirkungs-

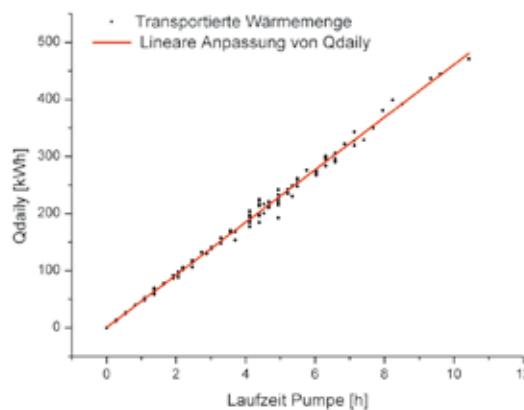


Abb. 3.4-3: Abhängigkeit der transportierten Energie von der Pumpenlaufzeit auf Basis von Simulationsrechnungen in TRNSYS

los beziehungsweise würde die Wirkung viel zu spät einsetzen. Die Berechnung der erforderlichen

Kühlenergie erfolgt wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben. Der Vorteil des Nachtbetriebs liegt vor allem in dem günstigeren Betriebsverhalten von Kältemaschinen, deren Rückkühlung bei kühleren Außentemperaturen effektiver arbeitet. Der Primärenergieverbrauch kann dadurch bei Systemen, die mit Kältemaschinen gespeist werden, gesenkt werden. Bei der Versorgung durch Erdsonden spielt das keine Rolle.

Betrieb mit Pulsweitenmodulation

Bei der PWM-Ansteuerung der Pumpen wird die mit dem vereinfachten Modell berechnete erforderliche Laufzeit der Anlage gleichmäßig über 24 Stunden verteilt. Im Vergleich mit der konventionellen Betriebsweise ist hier wie auch beim Nachtbetrieb mit erheblich reduzierten Pumpenlaufzeiten zu rechnen. Ob und wie sich die unterschiedlichen Betriebsweisen auf den Raumkomfort auswirken, ist in einer im folgenden Abschnitt beschriebenen Simulationsstudie ermittelt worden.

Simulationsergebnisse

Die Abbildungen 3.4-4, 3.4-5 und 3.4-6 zeigen das Betriebsverhalten der TABS für drei unterschiedliche Betriebsarten. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ist als Carpetplot dargestellt. Zeiten, in denen die Pumpe stillsteht, sind schwarz gekennzeichnet. Jeder senkrechte Streifen zeigt einen Tag, beginnend von unten. Die Farbe steht für die Temperaturdifferenz, die entsprechende Skala befindet sich am rechten Rand der Diagramme. Es ist zu beachten, dass die Skalierung in den drei Diagrammen unterschiedlich ist.

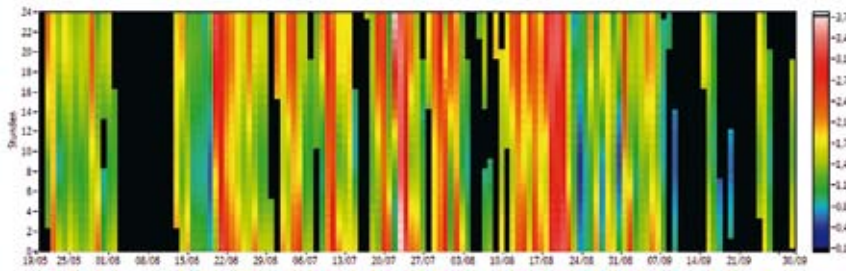


Abb. 3.4-4: Temperaturdifferenz Vorlauf-Rücklauf mit Regelung nach 24 Stunden-Mittelwert (Simulation)

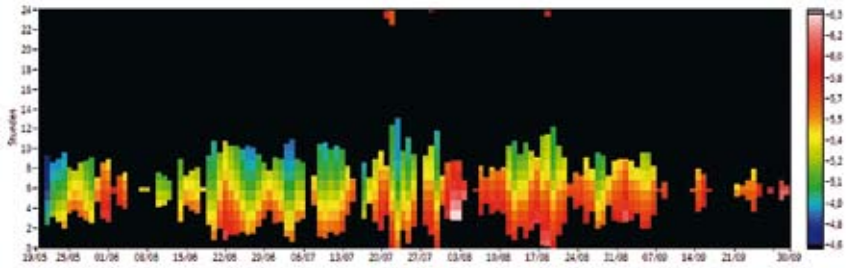


Abb. 3.4-5: Temperaturdifferenz Vorlauf-Rücklauf im prädiktiven Nachtbetrieb (Simulation)

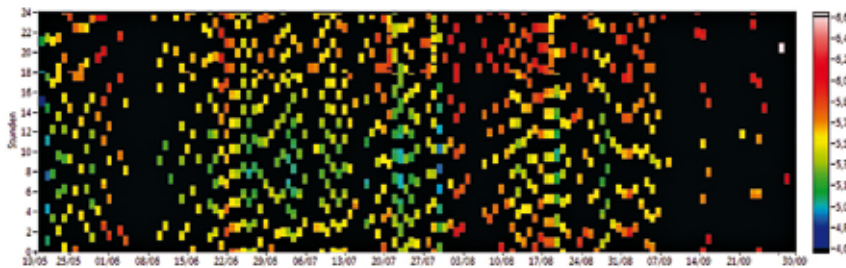


Abb. 3.4-6: Temperaturdifferenz Vorlauf-Rücklauf im prädiktiven Betrieb mit Pulsweitenmodulation (Simulation)

Für alle drei Betriebsarten wurden die Regelparameter so optimiert, dass Raumtemperaturen von 26 °C möglichst nicht überschritten werden. Dies lässt sich im Prinzip mit allen drei Betriebsarten erreichen, ein Vorteil der beiden prädiktiven Betriebsarten in Abbildung 3.4-5 und Abbildung 3.4-6 ist neben der Energieeinsparung das stabilere weil vorausschauende Verhalten bei Wetteränderungen.

Abbildung 3.4-4 zeigt einen konventionellen Betrieb des Systems mit Regelung der Vorlauftemperatur nach dem 24 Stunden-Mittelwert der Außentemperatur. Er ist gekennzeichnet durch lange Pumpenlaufzeiten und geringe Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf von maximal 3,7 K und typischen Werten unter 2 K.

Der prädiktive ununterbrochene Nachtbetrieb ergibt ein Muster, wie in Abbildung 3.4-5 gezeigt. Kennzeichnend hier die weitaus kürzeren Pumpenlaufzeiten und die erheblich größeren Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf von typisch 5 K und mehr.

Den ebenfalls auf Wetterprognosen beruhenden pulsweitenmodulierten Betrieb zeigt Abbildung 3.4-6. Deutlich zu erkennen ist der über den Tag verteilte Intervallbetrieb mit ähnlich hohen Temperaturspreizungen wie in Abbildung 3.4-5.

Die beiden prädiktiven Verfahren ergeben Vorteile in verschiedener Hinsicht. Neben der Einsparung an elektrischer Energie für die Pumpe um mehr als zwei Drittel lässt sich auch Kälteenergie einsparen, wenn auch in geringerem Um-

fang von 7 %. Gleichzeitig erhöht sich der Raumkomfort durch einen gleichmäßigeren Temperaturgang, der besonders bei Wetteränderungen zu beobachten ist.

Integration der Verfahren in ein Versuchsgebäude

Die Implementierung von prädiktiven Algorithmen in vorhandene Gebäudeautomationssysteme stellt die Entwickler vor nicht zu unterschätzende Aufgaben. Zum allergrößten Teil werden noch proprietäre Systeme traditioneller Hersteller der Gebäudeautomation sowohl auf der Automations- als auch auf der Leitebene eingesetzt. Dies macht die Einbindung von selbst entwickelten Regelalgorithmen und auch den Empfang von Wetterprognosen schwierig bis unmöglich. In den letzten Jahren haben sich allerdings vermehrt Leitechniken am Markt platziert, die meist aus der Industrie-Automation kommend offene Standards bieten und auch durch den Kunden mit neuen Funktionen erweitert werden können. Der Eigentümer des Bürogebäudes, an dem die prädiktiven Algorithmen im Sommer 2009 getestet werden sollten, konnte überzeugt werden, sich für eine solche herstellerneutrale Leitstation zu entscheiden.

Diese bietet dank standardisierter Schnittstellen die Möglichkeit, Automatisierungsgeräte unterschiedlichster Hersteller sowie sämtliche Gewerke der Gebäudetechnik aufzuschalten. Dabei bietet sie sämtliche Funktionen eines Leitsystems, wie sie auch proprietäre Systeme marktüblicher Hersteller der Gebäudeautomation haben.

Darüber hinaus ist sie in der Entwicklungsumgebung LabVIEW der Firma National Instruments programmiert und bietet damit den für dieses Forschungsvorhaben unschätzbaren Vorteil der Offenheit und die Möglichkeit, die hier entwickelten und ebenfalls in LabVIEW programmierten Algorithmen homogen in die Leitechnikumgebung einzubinden. Neben einem Webservice Client für die Abfrage der Wetterprognosen waren dies Programme zur Erstellung der Kältebedarfsprognosen, der Regelalgorithmen für bevorzugt nächtlichen sowie den pulsweitenmodulierten Betrieb und das Programm zur Kommunikation mit dem OPC-Server der DDC.

Ein Watchdog überwacht die Kommunikation und das Funktionieren der Leitebene. Bei Störung oder Ausfall schaltet die DDC die Betriebsart der Betonkernaktivierung auf den herkömmlichen 24 Stunden-Betrieb mit variabler Vorlauftemperatur um.

Betriebsergebnisse Sommer 2009

Eine Vielzahl technischer Probleme während und nach der Inbetriebnahme des Gebäudes führte zu einer TABS-Betriebsweise, die durch häufige Korrekturen an der Regelung gekennzeichnet war. Immer wieder tauchten Probleme auf oder wurden Probleme beseitigt, was in beiden Fällen zu stark verändertem Gebäudeverhalten führte. Erst gegen Ende der warmen Sommerperiode gab es eine Zeit ungestörten Gebäudebetriebs, in der sich der prädiktive Algorithmus bewähren konnte. Alle Decken wurden von Wasser durchströmt, die Kältemaschinen hatten nicht mehr ihre täglich auftretenden Störungen und die fehlerhafte Jalousien-Steuerung war nachgebessert worden. In den ersten Tagen des Septembers 2009 gab es nach Höchsttemperaturen von 32 °C einen Kälteeinbruch mit Abkühlung auf 19 °C. Wie der prädiktive PWM-Algorithmus darauf reagiert hat, ist in Abbildung 3.4-7 zu sehen. Noch vor dem Erreichen der höchsten Temperatur am 1. September wird die Kühlung (blaue Kurve) abgeschaltet, weil der 2. September deutlich kühler sein wird. Trotz der großen Wetteränderungen auch an den Folgetagen kann das Gebäude in einem engen Temperaturband gehalten werden.

Damit konnten die in den Simulationsrechnungen gewonnenen Erkenntnisse der Vorteile prädiktiver Algorithmen bei Wetteränderungen auch in der Praxis bestätigt werden. Weiterhin bewiesen die Algorithmen trotz erschwelter Bedingungen durch gravierende Fehler in der Gebäudetechnik und Nachlässigkeiten bei der Inbetriebnahme ihre Zuverlässigkeit.

Ausblick

Der hier beschriebene Aufwand an Simulationsrechnungen ist hoch und kann natürlich nicht für jedes einzelne Gebäude aufs Neue betrieben werden. Er war hier jedoch notwendig, um das beschriebene prädiktive Verfahren zu entwickeln und seine Eignung für den energieeffizienten Betrieb von TABS zu überprüfen. Nachdem dies erfolgreich gelungen ist, gilt es jetzt Möglichkeiten zu finden, diese Ergebnisse auf andere Gebäude zu übertragen.

Für jedes Gebäude wird es ein Kennfeld analog zu Abbildung 3.4-2 geben. Es wird für gegebene Wetterprognosen andere Kälte- oder Wärmemengen ergeben, die Steigung der Regressionsgeraden wird andere Werte haben und die Streuung aufgrund der Solarstrahlung wird variieren. Der zugrunde liegende Algorithmus allerdings wird sich nicht verändern, lediglich einige gebäudespezifische Parameter müssen angepasst werden. Dies kann durch Einstellregeln oder durch selbstadaptierende Algorithmen erfolgen und ist Gegenstand weiterer Arbeiten.

Referenzen/References

- [1] Bollin E., Feldmann T.: „Prädiktive Gebäudeautomation“; Proceedings des Facility Management Kongresses 2010, 9. – 11.3.2010, Messe Frankfurt
- [2] Feldmann T., Bollin E.: „Prädiktive Betriebsverfahren“; Zukunft bauen – Das Magazin der Forschungsinitiative Zukunft Bau, Herausgeber Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; 2010
- [3] Feldmann T.: „Energetische Optimierung des Gebäudebetriebs aktiv gekühlter Bauten“; Broschüre „Simulationsgestützte Automation für die Nachhaltige Sommerliche Klimatisierung von Gebäuden“, Herausgeber Bundesministerium für Bildung und Forschung; Berlin 2010

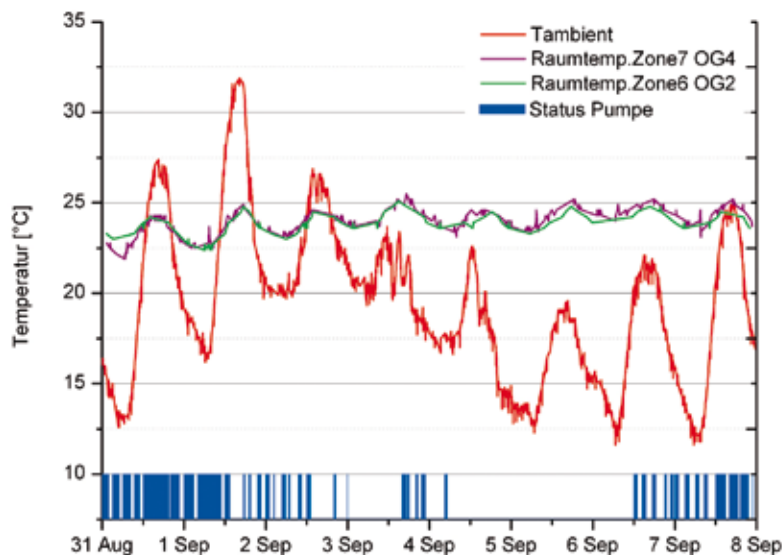


Abb. 3.4-7: PWM-Betrieb bei Tageshöchsttemperaturen zwischen 19 °C und 32 °C (reale Messwerte)