

Modellprädiktive Regelung für Heizungsanwendungen

Peter Gruber, Markus Gwerder, Jürg Tödtli,
Siemens Building Technology,
Landis & Stäfa Division,
Zug, Schweiz

Abstract

Siemens Building Technologies Landis & Stäfa Division entwickelte einen Algorithmus zur modellprädiktiven Regelung einer Gebäudebeheizung, welcher zunächst in Simulationen mit gemessenen Wetterdaten und später in Tests an realen Gebäuden eingesetzt wurde. Der Regelalgorithmus bedient sich einer Technik zur numerischen Optimierung linearer dynamischer Systeme mit Eingangs-, Eingangsänderungs- sowie Zustandsbeschränkungen. Periodisch (beispielsweise im Zwanzigminutentakt) wird der Vorlauftemperatursollwert so berechnet, dass die gewünschte Raumtemperatur über einen Optimierungshorizont von drei Tagen mit minimalem Energieverbrauch erreicht werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, verwendet der Optimierungsalgorithmus Vorhersagen der Störungen, welche während des Optimierungshorizontes auf die zu regelnden Räume wirken.

Der Algorithmus ist eine Alternative zur klassischen aussentemperaturgeführten Heizungsregelung mit Heizkurve, einer *optimum start and stop control* (OSSC) und einem Heizgrenzenschalter – die Dynamik und praktische Beschränkungen werden dabei in einer „natürlicheren“ Art verarbeitet. Vorteile des Algorithmus sind: Komfort mit minimalem Energieverbrauch, einfaches *tuning*, leichte Verständlichkeit und die Möglichkeit einfacher Erweiterungen und Anpassungen zur Verwendung in anderen Anwendungen.

Zur Validierung des Algorithmus wurden Simulationen sowie zwei Tests an realen Bürogebäuden durchgeführt, welche vielversprechend verliefen und bei welchen sich der entwickelte Algorithmus als praxistauglich erwies.

Einführung

Der von Siemens Building Technologies Landis & Stäfa Division entwickelte Algorithmus erlaubt die modellprädiktive Regelung einer Warmwasser-Zentralheizung. Eine periodisch ausgeführte numerische Optimierung eines linearen dynamischen Gebäudemodells mit Eingangs-, Eingangsänderungs- sowie Zustandsbeschränkungen ermittelt den Vorlauftemperatursollwert so, dass die gewünschte Raumtemperatur mit minimalem

Energieverbrauch eingehalten wird. In die Optimierung geht zusätzlich die über den Optimierungshorizont vorhergesagte Aussen-temperatur ein.

Die hier beschriebene Regelungsanwendung ist die aussentemperaturkompensierende Regelung von Heizungssystemen. Der neue Algorithmus wurde für zwei verschiedene Fälle entwickelt:

1. In einem Gebäude mit vielen Räumen wird ein nordorientierter Raum (kleiner Fremdwärmeeinfluss) als Referenzraum benutzt, wo die Raumtemperatur gemessen und zumindest für die Prozessadaption verwendet wird. Die übrigen Räume sind mit Thermostatventilen ausgerüstet und werden mit Warmwasser desselben Heizkreises versorgt.
2. Gleiche Situation wie bei 1), ausser dass kein Raumtemperaturfühler verfügbar ist. Demzufolge kann keine automatische Prozessadaption erfolgen.

Hier wird nur der Fall 1) beschrieben. Die erreichten Ziele des präsentierten prädiktiven Reglers sind:

1. Herkömmliche aussentemperaturgeführte Heizungsregler beinhalten unter anderem drei Funktionen:
 - Vorlauftemperaturregelung, deren Sollwert durch die Heizkurve aufgrund der Aussen-temperatur vorgegeben wird. Dabei findet ein statisches Modell des Raumes (Heizkurve) Verwendung, welches erweitert wird durch ein dynamisches Modell, um die Trägheit der Aussenwände einzubringen.
 - *Optimum start and stop control* (OSSC) wird angewandt, um Innentemperatursollwertsprünge (beispielsweise aufgrund eines Raumbelungsplans) auf energie- und kostengünstige Weise auszuführen. Die Innentemperaturprädiktion erfolgt durch ein dynamisches Gebäudemodell.
 - Der Heizgrenzenschalter – ein Algorithmus zum An- und Abschalten der Heizungsanlage – arbeitet mit einem weiteren dynamischen Gebäudemodell.

Die Methode des prädiktiven Reglers erlaubt es, diese drei Algorithmen durch eine Funkti-

- on zu ersetzen. Nur ein Gebäudemodell mit einem einzigen Parametersatz wird verwendet.
- Die prädiktive Regelung regelt die Anlage so, dass der verlangte Komfort erreicht wird bei minimalem Energieverbrauch. Um dies zu erreichen, wird eine Zielfunktion minimiert, welche grundsätzlich die benötigte Energie über den betrachteten Optimierungshorizont wiedergibt. Die Anforderungen an den Komfort werden dabei nicht in der Zielfunktion, sondern in der Form von Ungleichungen eingebracht.
 - Die neue Methode ermöglicht eine Erweiterung auf neue Anwendungen wie beispielsweise die folgenden:
 - Der Einfluss des Benutzerverhaltens auf Komfort und Energieverbrauch kann geschätzt werden durch modellprädiktive Berechnung.
 - Warnungen aufgrund berechneter Vorhersagen können generiert werden, z.B. Frostalarm.
 - Größen wie geschätzte Fremdwärme oder Heizkurvenparameter können überwacht werden.
 - Falls alle Räume des Heizkreises durch die Sonneneinstrahlung beeinflusst werden (Einfamilienhäuser, südorientierte Räume in Bürogebäuden) und die Sonneneinstrahlung gemessen wird, kann die Wettervorhersage durch eine Solarwärmestromschätzung erweitert werden.
 - Systeme mit Wärmespeicherung können unter Berücksichtigung von Tarifstrukturen ähnlich behandelt werden.

Regelkonzept

Das Regelkonzept ist in Fig. 1 bildlich dargestellt. Das durch den prädiktiven Regler zu regelnde System besteht aus der Vorlauftemperaturregelung und dem Raum, der beheizt werden muss. Die Reglerausgänge sind der Sollwert der Vorlauftemperatur und das durch eine Logik gesetzte Pumpensignal (nicht abgebildet in Fig. 1); Reglereingänge sind die gemessene Raumtemperatur und die Störgröße Aussentemperatur. Nicht gemessene Störungen des Systems sind solare und interne Wärmegewinne (Fremdwärme). Der prädiktive Regler enthält ein Gebäudemodell, welches durch Differenzen- und algebraische Gleichungen beschrieben wird. Ein Belegungsprofil ist bekannt über mindestens den jeweiligen Optimierungshorizont der Länge L . Zu einer Zeit $t=kT$ (mit T als Samplingzeit) arbeitet der Regelalgorithmus folgende Aufgaben ab:

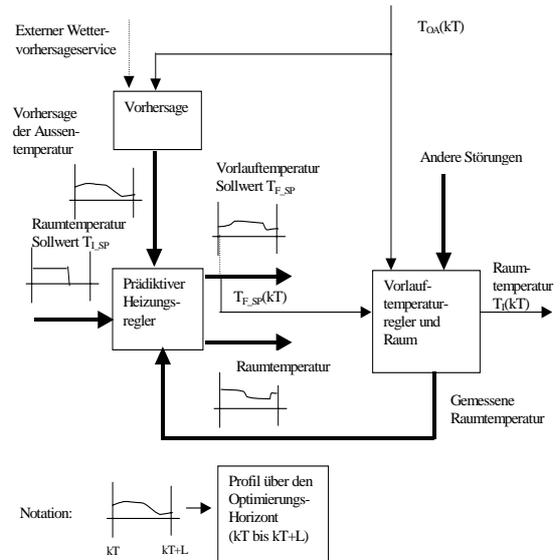


Fig. 1. Regelkonzept

- Ein Profil der vorhergesagten Störungen (Aussentemperatur) über den Optimierungshorizont der Länge L wird durch die Vorhersagefunktion erstellt. Dies geschieht durch bis anhin gemessene Daten und wenn möglich auch durch über Internet verfügbare Wettervorhersagedaten.
- Das Raubelegungsprofil für den zum Zeitpunkt kT betrachteten Optimierungshorizont wird aufgebaut.
- Der Zustand des zu regelnden Gebäudemodells wird gemessen oder durch einen Beobachter geschätzt.
- Um das zukünftige Verhalten des Gebäudes vorhersagen zu können, muss der Regler ein Gebäudemodell beinhalten. Sind die Parameter dieses Modells nicht bekannt, so werden diese durch eine Adaption geschätzt.
- Der prädiktive Regler berechnet dasjenige Vorlauftemperaturprofil über den Optimierungshorizont, welches die Zielfunktion minimiert. Dabei müssen die Systemgleichungen sowie die spezifizierten Beschränkungen der Innentemperatur, der Vorlauftemperatur und der Vorlauftemperaturänderungen eingehalten werden. Zusätzliche Ausgänge des Reglers sind Vorhersageprofile der Zustände des Gebäudemodells (Innentemperatur).
- Der erste Wert des optimierten Vorlauftemperaturprofils wird als aktueller Sollwert ausgegeben. Aufgrund der Ungewissheit der Vorhersage, der nicht vorhergesagten Störgrößen und den Modellunsicherheiten wird der Rest des Profils nicht verwertet.

7. Die Schritte 1 bis 6 werden eine Samplingzeit später ($k=k+T$) erneut ausgeführt (*receding horizon strategy*).

Der Algorithmus wird in [Gruber et al. 1999, Gruber et al. 2001] detaillierter beschrieben.

Aussentemperaturvorhersagen können verschiedenster Art sein: Eine einfache Methode besteht darin, den Temperaturverlauf der letzten 24 Stunden zu kopieren und mit der momentanen Aussentemperatur in Einklang zu bringen (mittels Korrektur zu Beginn der Vorhersage oder Verschiebung des Gesamtverlaufes). Auch ARX-Modelle oder neuronale Netzwerke sind als Vorhersagemodelle ebenfalls geeignet [NEUROBAT 1998]. Natürlich können auch Wetterdaten einer externen Wettervorhersage-station (beispielsweise über Internet) bezogen und eventuell weiterverarbeitet werden [in't Groen 2000, ASHRAE 1993].

Gebäudemodell

Das gewählte Gebäudemodell ist linear und von zweiter Ordnung. Es soll diejenigen Elemente des Gebäudeverhaltens wiedergeben, welche zur Erfüllung der Regelaufgabe benötigt werden. Lineare Modelle erlauben den Einsatz schneller Optimierungsmethoden. Weiter wird angenommen, dass die Vorlauftemperatur durch einen PI-Regler (ohne stationären Fehler) geregelt wird. Das Gebäudemodell ist physikalisch dargestellt in Fig. 2. Die zwei Wärmespeicher des Gebäudemodells sind die Raumluft und die leichten inneren Bauteile (Temperatur T_I , Kapazität $C_{IB\&RL}$) sowie die zusammengefassten Aussenwände (Temperatur T_{OW} , Kapazität C_{OW}). Auf den ersten Speicher wirken die Heizleistung P_H sowie der Fremdwärmestrom Q_F direkt. Über die beiden erweiterten Wärmeleitwerte G_{ID} der Aussenwand findet ein indirekter, über den Wärmeleitwert G_D ein direkter Wärmeaustausch zwischen Innen und Aussen (Aussentemperatur T_{OA}) statt. Im Modell wird auch benutzt, dass bei stationärem Betrieb die Heizleistung mit Hilfe der Vorlauftemperatur und der Raumtemperatur ausgedrückt werden kann [Tödli 1984].

Für die Optimierung muss das Gebäudemodell in der diskreten Form vorliegen. Die Parameter dieses diskreten Gebäudemodells können durch eine Adaption, beispielsweise durch ein rekursives *least squares* Verfahren, geschätzt werden [Kraus 1986].

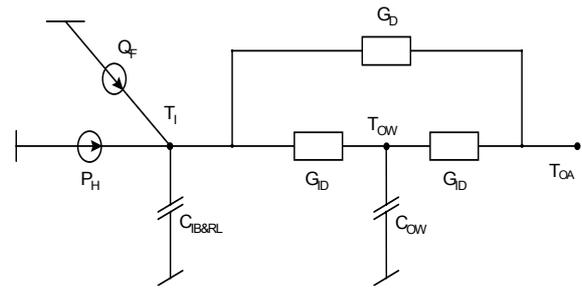


Fig. 2. Gebäudemodell

Um Modellfehler im höherfrequenten Bereich und Störungseinflüsse auf die Regelung möglichst einzudämmen, kann ein Zustandsbeobachter eingesetzt werden. Der Beobachter wirkt dabei hauptsächlich als ein Filter, was sich sowohl in Simulationen als auch in realen Tests als sehr nützlich erwies.

Optimierung

Als Optimierungstechnik wurde die lineare Programmierung gewählt. Dabei werden lineare Gleichungen und Ungleichungen unter Minimierung einer linearen Zielfunktion gelöst. Der Optimierungshorizont kann ausgedehnt werden bis auf drei Tage, um Innentemperatursollwertsprünge – beispielsweise nach Wochenenden – genügend früh antizipieren zu können. Für jeden vorausgesagten Zeitpunkt ergibt sich eine Systemgleichung, welche sich des Gebäudemodells bedient. Zusätzlich werden für jeden dieser Zeitpunkte Ungleichungen formuliert, in welchen die Innentemperatur nach unten und die Vorlauftemperatur gegen unten und oben beschränkt werden. Damit wird sichergestellt, dass die Innentemperatur nicht unter die gewünschte Komforttemperatur fällt. Die Vorlauftemperatur wird gegen unten auf die Raumtemperatur beschränkt; damit wird die physikalisch nicht mögliche Kühlung des Raumes auch mathematisch ausgeschlossen. Gegen oben muss die Vorlauftemperatur aufgrund der endlichen maximalen Heizleistung beschränkt werden. Weitere Ungleichungen werden benötigt, um Vorlauftemperaturänderungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten zu limitieren, sowohl Zunahme wie Abnahmebeschränkungen sind zu formulieren.

Die Zielfunktion, in welche nur die Vorlauftemperaturen über den Optimierungshorizont eingehen, wird durch das Optimierungsverfahren minimiert, wobei sowohl die Systemgleichungen wie auch die beschriebenen Ungleichungen erfüllt werden müssen. Dieses Vorgehen entspricht einem energieoptimalen Betrieb der Gebäudebeheizung. Wie im Regelkonzept beschrieben, wird nur der jeweils erste Wert des Vorlauftempera-

turprofils auch verwendet und die Optimierung wird mit den neuen Mess- und Prognosedaten eine Samplingzeit später erneut ausgeführt.

Um die Grösse des Optimierungsproblems und somit die Rechenzeit einzugrenzen, kann der Optimierungshorizont so eingeteilt werden, dass in naher Zukunft zunächst mit kleineren Zeitschritten gearbeitet, später dann auf grössere Schrittwerten umgestellt wird. Dieses Vorgehen kann dadurch gerechtfertigt werden, dass die (Vorhersage-) Informationen für die nahe Zukunft genauer sind und für die meisten Optimierungsprobleme die Geschehnisse in naher Zukunft auch wichtiger ist als diejenigen der fernen Zukunft. Beispielsweise kann nun ein Optimierungshorizont von drei Tagen so eingeteilt werden, dass für die ersten 24 Stunden mit Schrittwerten von 15 Minuten, später dann mit Schritten von einer Stunde Länge gearbeitet wird. Dadurch können bei relativ kleiner Problemgrösse auch Aufheizphasen nach Wochenenden integriert werden.

Der in den Simulationen wie auch den realen Tests mit dem Prototypen eingesetzte Optimierungsalgorithmus ist eine Version des bekannten Simplex Algorithmus [Press et al. 1992]. Dabei wird das Standardproblem der linearen Programmierung gelöst [Gill et al. 1991].

Resultate der Prototypversuche

Ein Prototyp des prädiktiven Heizungsreglers wurde in MATLAB programmiert. Dabei wurde auf Funktionen aus speziellen Toolboxen verzichtet. Der Prototypalgorithmus wurde während eineinhalb Jahren bzw. einem Jahr an zwei verschiedenen Gebäuden in Zug getestet. Beide Häuser sind Bürogebäude, in denen ein Heizkreis mehrere Räume versorgt. In beiden Fällen wurde der Algorithmus mit denselben Einstellungen – sowohl mit als auch ohne Informationen einer externen Wetterstation – verwendet. Ein den Algorithmus abarbeitender PC kommuniziert über Kommunikationssoftware mit einer *building energy management station* (BEMS).

Die Samplingzeit wurde auf 20 Minuten festgesetzt. Mit dieser Samplingzeit wird auch innerhalb der Optimierung für die ersten 24 Stunden gerechnet, danach wird mittels vierfach vergrösserten Intervallen (80 Minuten) der Optimierungshorizont auf drei Tage ausgedehnt. Die Vorlauftemperatur ist begrenzt zwischen dem zum betrachteten Zeitpunkt aktuellen bzw. vorausgesagten Raumtemperaturwert und 60°C. Die Zunahme der Vorlauftemperatur pro Samplingzeit ist beschränkt auf 10°C, die Abnahme derselben pro Samplingzeit auf 7.5°C. Die Pumpe wird ein- und ausgeschaltet durch eine Schaltung mit

Hysterese, welche den Vorlauf-temperatursollwert mit der Raumtemperatur vergleicht.

Die mit dem Prototypen erzielten Resultate waren vielversprechend.

zeigt Messungen über vier Werkstage, wobei folgende Kurven dargestellt sind:

1. Pumpensignal: entweder ein (10) oder aus (0)
2. Aussentemperatur: hier variierend zwischen 0 und 10°C
3. Raumtemperatursollwert: bei Belegung 21.5°C, bei Nichtbelegung mindestens 14°C
4. Raumtemperatur
5. Versorgungstemperatur: bis zu 80°C
6. Vorlauftemperatursollwert: zwischen Raumtemperatur und 60°C
7. Gemessene Vorlauftemperatur

Im gezeigten Fall ist die Aussentemperatur relativ hoch, weshalb die Raumtemperatur während der Nächte auch nur geringfügig absinkt. Der minimal geforderte Raumtemperaturwert bei Nichtbelegung wird deshalb nie erreicht, während bei Belegung der Raumtemperatursollwert sehr gut eingehalten wird. Interessant ist der Verlauf des Vorlauftemperatursollwertes: Die Aufheizphasen am frühen Morgen sind deutlich zu erkennen; die Vorlauftemperatur wird jeweils so spät wie möglich bis zum Grenzwert von 60°C erhöht, um die Raumtemperatur zu Beginn der Belegung genau auf den geforderten Sollwert zu bringen. Während der Belegungsphasen sind jeweils zwei Buckel im Vorlauftemperaturprofil enthalten, die durch Modellfehler und vor allem auch durch Störungen (Fremdwärme) erklärt werden können. Bei Absenckphasen zeigt sich zudem, dass die Vorlauftemperatur ihrem Sollwert nicht immer folgen kann, da der Abkühlungsprozess des Heizwassers nicht im Gebäudemodell des Reglers enthalten ist.

Schlussbemerkung

Abschliessend kann gesagt werden, dass der Algorithmus des prädiktiven Heizungsreglers bei Simulationstests wie auch bei realen Tests erfolgreich war. Die zu Beginn des Projekts festgesetzten Ziele wurden erfüllt. Das *tuning* des Reglers gestaltete sich einfach und die Akzeptanz der Benutzer in realen Tests war gut. Für den Operator ist das Arbeiten mit dem Regler einfach und zugleich attraktiv, da praktische Limitationen wie zum Beispiel die Beschränkung der Vorlauftemperatur direkt von der Regelung berücksichtigt werden. Auch das Regelkonzept des prädiktiven Reglers kann vom Operator leicht verstanden werden.

Die Frage nach dem Energiesparpotential der Methode kann noch nicht vollständig beantwortet werden. Gegenüber einer konventionellen Regelung, bei der Heizkurve, OSSC sowie die Heizgrenzen gut eingestellt sind, wird kaum eine wesentliche Energieeinsparung erwartet. Da in der Praxis oft solche Einstellungsarbeit vernachlässigt wird, ist mit dem neuen Algorithmus in vielen Fällen eine Verbesserung zu erwarten.

Eine Implementation des patentierten prädiktiven Regelalgorithmus wird auf zwei verschiedene Arten vorangetrieben: Einerseits sind für einen Einsatz im Standardkontroller noch Änderungen vorzunehmen, welche die Schnelligkeit und die Speicherbelegung betreffen. Andererseits wird an einer Implementation auf Gebäudeleitsystemebene gearbeitet.

Literatur

1. ASHRAE 1993: *ASHRAE Handbook Fundamentals*, chapter 26.6
2. P. E. Gill, W. Murray, M. H. Wright 1991: *Numerical Algebra and Optimization*, Vol. 1, Addison Wesley
3. D. in't Groen 2000: *Applications of weather forecast*, Diploma thesis Hogschool van Utrecht and Siemens Landis & Staefa May 2000
4. P. Gruber, M. Gwerder, P. Sprecher, J. Tödtli 1999: *Prädiktiver Heizungsregler*, Internal report, Siemens Landis & Staefa
5. P. Gruber, M. Gwerder, J. Tödtli 2001: *Predictive Control for Heating Applications*, Clima 2000 Napoli 2001
6. F. Kraus: *Das Vergessen in rekursiven Parameterschätzverfahren*, Diss Nr. 8012, ETH Zürich 1986
7. P. J. Lute: *The use of predictions in temperature control in buildings, A passive climate system application*. Delft University of Technology, 1992
8. NEUROBAT 1998: *Final report: Predictive Neuro-fuzzy Building Control System*, CSEM Neuchâtel, EPFL, May 1998
10. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery 1992: *Numerical Recipes in C*, second edition, p. 439-443
11. J. Tödtli 1984: *Projektorientierte Studienarbeiten in Automatik: Einige Grundlagen zur Wärmeversorgung von Gebäuden*, ETH Zürich 1984

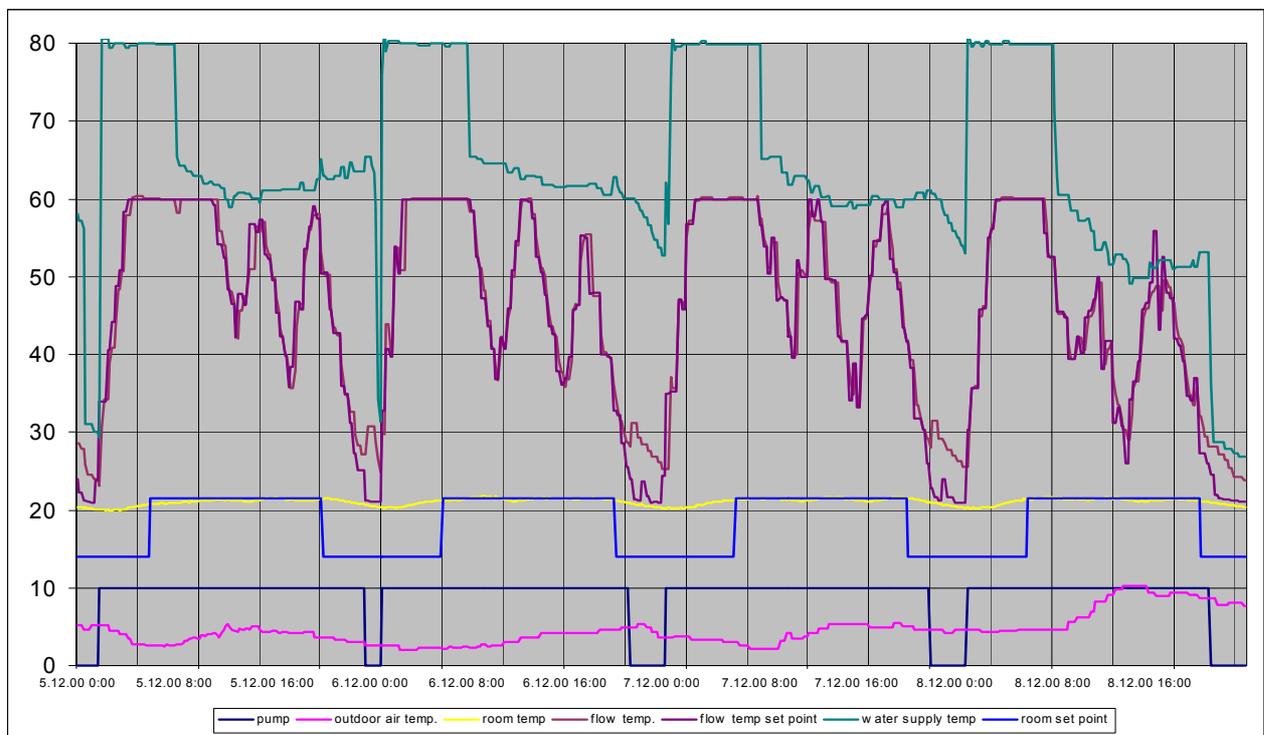


Fig. 3 Prototypversuch, Werktage vom 5. bis 8.12.2000