

## Kurzbericht

---

**Verbesserung von Energieeffizienz und Komfort  
im Gebäudebetrieb durch den Einsatz  
prädiktiver Betriebsverfahren (PräBV)**

---



**Hochschule Offenburg**  
University of Applied Sciences

Institut für Energiesystemtechnik (INES)  
Badstr. 24  
77652 Offenburg

Projektleitung: Prof. Elmar Bollin  
Bearbeitung: Thomas Feldmann

Sept. 2009 – März 2012

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung in Vertretung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung gefördert.

(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7- 09.19 / II 3 – F20-09-1-039)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor

# PräBV - Verbesserung von Energieeffizienz und Komfort im Gebäudebetrieb durch den Einsatz prädiktiver Betriebsverfahren

## 1 Ziel des Projektes

Auf dem Gebiet der technischen Gebäudeausrüstung sind in den letzten Jahren viele neue Möglichkeiten der Energieversorgung und –Verteilung entwickelt worden. Diese sind immer häufiger im Neubaubereich und teilweise auch schon der Sanierung von Gebäudebeständen zu sehen. Typische Beispiele sind Technologien zur Nutzung von Geothermie für die Gewinnung von Wärme und Kälte oder neue Systeme zur Energieverteilung, wie zum Beispiel wasser- oder luftführende Systeme in Gebäudeteilen großer Masse, die so genannte Betonkernaktivierung.

Auch neue Verfahren, die schon vorhandene Technik nutzen, sind entwickelt worden. Ein Beispiel hierfür ist die freie Nachtlüftung. Mit der Nachtlüftung werden vorhandene Lüftungssysteme genutzt, um ohne den Einsatz von Klimaanlage den Komfort im Gebäude in den vorgeschriebenen Grenzen zu halten.

Langzeituntersuchungen haben gezeigt, dass die konventionelle Gebäudeautomation mit ihren vorhandenen Algorithmen nicht in der Lage ist, die möglichen Energieeinspar-Potenziale vollständig auszuschöpfen und nachhaltige Energiequellen optimal zum Einsatz zu bringen.

Dies liegt unter anderem daran, dass die Gebäudetechnik immer komplexer wird. Es gibt häufig nicht nur eine Möglichkeit um zu heizen oder zu kühlen. Meist stehen mehrere Energiequellen (erneuerbare und fossile) sowie unterschiedliche Verteilsysteme zur Verfügung. Ergänzende Komponenten sind meist Speicher für Wärme und Kälte, um das wetterabhängige Angebot regenerativer Energiequellen ausgleichen zu können. Das optimale Zusammenwirken all dieser unterschiedlichen Komponenten lässt sich mit den herkömmlichen Verfahren der Gebäudeautomation nicht erreichen.

Sobald Energiespeicher oder sehr träge Prozesse wie die Betonkernaktivierung im System vorhanden sind tauchen betriebsdynamische Fragestellungen, wie zum Beispiel die eines optimalen Speichermanagements, auf.

In der Praxis werden zunehmend Wetterprognosen in Systeme der Gebäudeautomation integriert. Meist werden jedoch lediglich konventionelle Automationsverfahren verbessert, indem die Stellgrößen mit Korrekturen versehen werden, die aufgrund von Wetterprognosen gebildet werden. Damit kann jedoch das mögliche Potential nicht ausgeschöpft werden. Als Beispiel sei hier die Steuerung von thermisch aktiven Bauteilsystemen (TABS) genannt, die durchweg mit variabler Vorlauftemperatur betrieben werden. Diese wird anhand von Heiz- und Kühlkurven in Abhängigkeit der Außentemperatur gebildet. Wenn Wetterprognosen genutzt werden, erfolgt die Korrektur der Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der prognostizierten Daten für die Außentemperatur und eventuell noch der Globalstrahlung. Eine Regelung ist aufgrund der großen Trägheit der TABS nicht möglich, der Energiebedarf des Gebäudes ist nicht bekannt. Die Auslegung der Steuerung erfolgt anhand von Erfahrungswerten und durch manuelle Korrekturen im Gebäudebetrieb bis ein zufriedenstellendes Verhalten erreicht wird.

Um das Potential, das in der Nutzung von Wetterprognosen liegt auszunutzen zu können, sollte jedoch der künftige Energiebedarf der Gebäude oder einzelner Zonen prognostiziert werden. Diese Energiemenge kann dann mit möglichst hoher Effizienz in die speichernden Bauteile eingebracht werden. Dies wird erreicht, indem die Systeme mit maximal oder minimal möglicher Vorlauftemperatur betrieben werden. Die Betriebszeit der Systeme wird dadurch minimiert, der Energiebedarf und auch der Raumkomfort optimiert.

Ziel des Projektes Projekts PräBV ist die Entwicklung neuer prädiktiver Algorithmen für die Gebäudeautomation, die in der Lage sind trotz der beschriebenen Probleme und Herausforderungen einen im Sinne der Energieeffizienz, der Nachhaltigkeit und des Komforts optimalen Gebäudebetrieb zu ermöglichen.

Hierfür ist es notwendig, für den jeweiligen Standort der Gebäude individuell angepasste Wetterprognosen verfügbar zu machen. Dazu soll ein neues Verfahren entwickelt und erprobt werden. Wetterprognosen sollen über Langwellenfunk empfangen werden und vor Ort mit Hilfe von Wettermessdaten für den jeweiligen Standort hinsichtlich Präzision und Detailierungsgrad optimiert werden.

Neben der Bereitstellung des Serviceangebotes „Standorte-Wetterprognose“ sind Empfangsgeräte zu entwickeln, die in der Gebäudeautomation eingesetzt werden können. Mit Hilfe neuartiger prädikativer Algorithmen sollen die individuellen Wetterprognosen in die vorhandene Gebäudeautomation so eingebunden werden, dass die Nutzung erneuerbarer Energiequellen maximiert und der Verbrauch fossiler Brennstoffe minimiert wird.

## **2 Entwicklung prädiktiver Verfahren für die Gebäudeautomation**

### **2.1 Entwicklungsumgebung**

Für die Entwicklung der prädiktiven Automationsverfahren ist eine einheitliche Testumgebung durch die Kopplung der Programme TRNSYS und MATLAB erstellt worden. Die Einbindung von MATLAB in die Gebäudesimulation von TRNSYS ermöglicht die Entwicklung und den Test von mathematisch komplexen Algorithmen. Die Simulation des Gebäudes mit seinen thermisch aktiven Bauteilen wird in TRNSYS zuverlässig und bewährt durchgeführt. Die Abbildung der inneren Lasten sowie die von einfachen Aufgaben der Gebäudeautomation wie die Licht- und Jalousiensteuerung werden ebenfalls in TRNSYS realisiert. Die Entwicklung und die Simulation der prädiktiven und selbstlernenden Verfahren der TABS-Steuerung werden in MATLAB ausgelagert. Dies ermöglicht die Realisierung von komplexen mathematischen Verfahren bei voller Integration in die dynamische Simulation des Gebäudes. Als Versuchsgebäude ist ein eingeschossiges Gebäude mit sechs Zonen in TRNSYS modelliert worden. Die Decken sind als thermisch aktive Bauteile (TABS) ausgeführt und dienen zur Beheizung und Kühlung des Gebäudes. Die TABS einer jeden Zone sind separat ansteuerbar. Diese Entwicklungsumgebung ist von allen Projektpartnern für den Entwurf der prädiktiven und selbstlernenden Verfahren genutzt worden und hat sich ausgesprochen gut bewährt.

## 2.2 Prinzip der Energiebedarfsprognose

Für das Betreiben thermisch aktiver Bauteilsysteme (TABS) als typischem Anwendungsfall für prädiktive Verfahren sind verschiedene Ansätze entwickelt worden. Sie basieren alle auf dem Prinzip der Energiebedarfsprognose in Verbindung mit dem Betreiben der TABS bei maximal beziehungsweise minimal möglicher Vorlauftemperatur und der dadurch zu erzielenden maximalen Effizienz des Gesamtsystems. Die Steuerung der Energiemengen erfolgt rein zeitgesteuert und nicht durch Variation von Vorlauftemperatur oder Massenstrom.

Um anhand von Wetterprognosen den Energiebedarf des Gebäudes bestimmen zu können ist die Entwicklung von einfachen Energiebedarfsmodellen notwendig, die in der Gebäudeautomation eingesetzt werden können.

In einem ersten Ansatz wurde das TRNSYS-Gebäudemodell mit idealer Heizung und idealer Kühlung betrieben. Man erhält dadurch diejenigen Energiemengen, die dem Gebäude theoretisch zugeführt werden müssten, um die Komfortbedingungen einhalten zu können. Die Art der Heizung und der Kühlung spielt hierbei keine Rolle, die dynamischen Eigenschaften der entsprechenden Systeme können in der Simulation daher auch nicht berücksichtigt werden. Als Ergebnis erhält man ein Prognosemodell, das sich schon für den Einsatz in realen Gebäuden eignet. Ein Justieren der Parameter im laufenden Betrieb, um das Modell an die Realität anzupassen, ist jedoch erforderlich.

In einem weiteren Verfahren sind die TABS im Gebäudemodell mit abgebildet worden. Damit ist dann für jeden Tag des Jahres in einem iterativen Verfahren die Mindestbetriebsdauer des Systems bestimmt worden, die für die Einhaltung der Komfortgrenzen erforderlich ist. Das Ergebnis stellt das Optimum dessen dar, was mit prädiktiven Verfahren erreichbar ist, sowohl den Komfort als auch den Energiebedarf betreffend. Die Ergebnisse dieser aufwendigen Simulation lassen sich durch ein multiples lineares Regressionsverfahren zur Erstellung von Energiebedarfsmodellen nutzen und bilden das reale Verhalten des Gebäudes sehr gut ab. Liegen ausreichend historische Messdaten eines zufriedenstellenden Betriebs mit TABS vor, lassen sich die Modelle auch sehr einfach aus diesen historischen Daten erstellen.

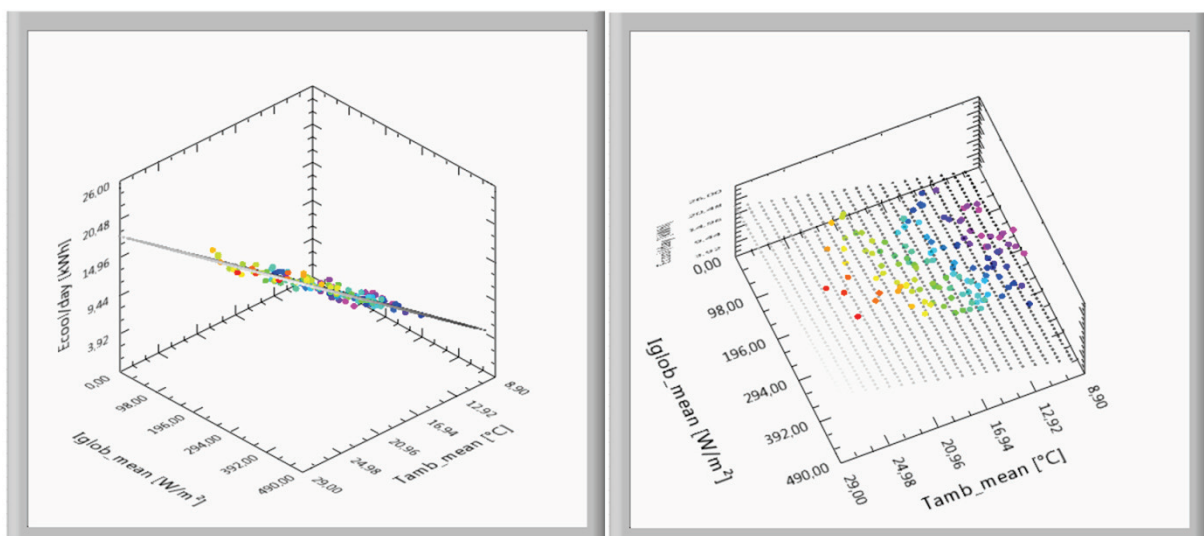


Abb. 1 Zwei Ansichten eines multiplen linearer Fits für den Kühlenergiebedarf an Arbeitstagen in Zone SE

Eine solche Modellbildung ist in Abb. 1 gezeigt. Dargestellt ist der tägliche Kühlenergiebedarf einer Zone des Versuchsgebäudes in Abhängigkeit vom Tagesmittelwert der Außentemperatur und der Globalstrahlung. Aufgrund des linearen Zusammenhangs lässt sich das Energiebedarfsmodell durch eine Ebenengleichung darstellen. Diese erhält man durch ein multiples lineares Regressionsverfahren aus historischen Messdaten oder aus Simulationsergebnissen. Liegen jetzt Tagesmittelwerte für Außentemperatur und Globalstrahlung als Prognose vor, lässt sich der Kühlenergiebedarf für die kommenden Tage prognostizieren. Dieser kann dann rechtzeitig und gezielt und mit hoher Effizienz in die Zone einbringen.

Der Vergleich der vorgestellten prädiktiven Betriebsweisen mit den heute üblichen Verfahren mit von der Außentemperatur abhängiger variabler Vorlauftemperatur zeigt das mögliche Potential auf. Vergleichende Simulationsrechnungen ergaben Einsparungen in der Größenordnung von 20 bis 30 %. Eine aufwendige Sensitivitätsanalyse konnte einen Zusammenhang zwischen zugeführter Energiemenge und Änderung in der Raumtemperatur aufzeigen. Dieser Zusammenhang kann für ein selbstlernendes Verfahren auf der Basis eines Fuzzy-Expertensystems genutzt werden, das die Inbetriebnahme und die laufende Anpassung an Änderungen im Systemverhalten, zum Beispiel durch Nutzungsänderung, wesentlich vereinfachen würde. Die fortwährende Korrektur des Energiebedarfsmodells eines Gebäudes wäre auf diese Weise aufgrund der Erfahrung aus dem Gebäudebetrieb selbst möglich.

### **2.3 Selbstlernende Algorithmen**

Ausgehend von einem einfachen prädiktiven Algorithmus, der auf dem Prinzip der Energiebedarfsprognose basiert, sind an der Hochschule Köln zwei selbstlernende Optimierungsverfahren untersucht worden. Die Aufgabe bestand darin, das Energiebedarfsmodell des prädiktiven Verfahrens an die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der sechs Zonen im Gebäudemodell anzupassen. In der Ausgangsversion sind alle sechs Zonen gleich angesteuert worden, was aufgrund unterschiedlicher thermischer Eigenschaften, bedingt durch unterschiedliche Fensterflächen und deren Orientierung, zu teilweise schlechten Ergebnissen führte. Dies entspricht der Situation, die üblicherweise bei der Inbetriebnahme von Gebäuden vorliegt. Die Steuerfunktionen für die einzelnen Zonen sind mit Hilfe der Messdaten des laufenden Betriebs korrigiert worden. Es wurde zum einen mit einem Regressionsmodell gearbeitet, zum anderen mit einem künstlichen neuronalen Netz (KNN).

Es hat sich gezeigt, dass die Verfahren nach einer Betriebszeit von ungefähr vier Wochen in der Lage waren, die geforderten Komfortbedingungen zwar nicht perfekt, aber doch insgesamt zufriedenstellend einzuhalten. Bei problematischen Zonen mit großer Fensterfläche und hohen solaren Gewinnen zeigte sich das Regressionsverfahren den KNN überlegen.

Eine zweite Aufgabe konnte ebenfalls mit befriedigendem Ergebnis gelöst werden. Durch Verwendung eines anderen Wetterdatensatzes (Bologna anstatt Stuttgart) sollten die Algorithmen ihre Leistungsfähigkeit bei der Anpassung an ein sich veränderndes Klima zeigen. Beide Verfahren zeigten eine erfolgreiche Anpassung des Energiebedarfsmodells an die veränderten klimatischen

Bedingungen. Die Ergebnisse zeigen jedoch noch relativ häufig auftretende Übertemperaturen, hier besteht noch Verbesserungsbedarf.

Als letzte und wie sich zeigte schwierigste Aufgabe, wurden ab Mitte Juli die internen Lasten verändert. Eine Reduktion um 25 % war problemlos zu korrigieren, weniger befriedigend waren die Ergebnisse bei der Reduktion auf 50 %, die erst nach vielen Wochen kompensiert werden konnten. Eine völlige Entfernung der inneren Lasten, also die Annahme von plötzlichem Leerstand, war von beiden Lernverfahren bis zum Jahresende nicht auszugleichen.

Die Untersuchungen zu selbstlernenden Verfahren auf Basis von Regressionsmodellen und künstlichen neuronalen Netzen konnten das grundsätzliche Funktionieren des Ansatzes aufzeigen, an der Methodik muss jedoch noch gearbeitet werden, um ein funktionsfähiges, in der Praxis einsatzreifes Verfahren zu erhalten.

Ein grundsätzlich neues Prinzip für ein prädiktives Verfahren ist ebenfalls mit Hilfe der Entwicklungsumgebung TRNSYS/MATLAB an der Hochschule Offenburg entwickelt worden. Als Beispiel wurde die Bestimmung des optimalen Einschaltzeitpunkts einer Heizung gewählt. Die Vorgehensweise ist die, dass zunächst der zeitliche Verlauf der Raumtemperatur durch eine Differentialgleichung analytisch beschrieben wird. Anschließend ist ein Algorithmus entwickelt worden, der es ermöglicht, die in der Lösung der Differentialgleichung auftretenden Gebäudeparameter adaptiv während des Betriebes anhand von Messdaten zu bestimmen. Diese Lösung der Differentialgleichung stellt ein relativ einfaches Gebäudemodell dar. Nun kann während des Betriebs anhand von zyklisch stattfindenden Test- oder Versuchsrechnungen unter der Verwendung von Wetterprognosen bestimmt werden, wann die Heizung eingeschaltet werden muss damit zu Arbeitsbeginn die geforderte Raumtemperatur erreicht ist.

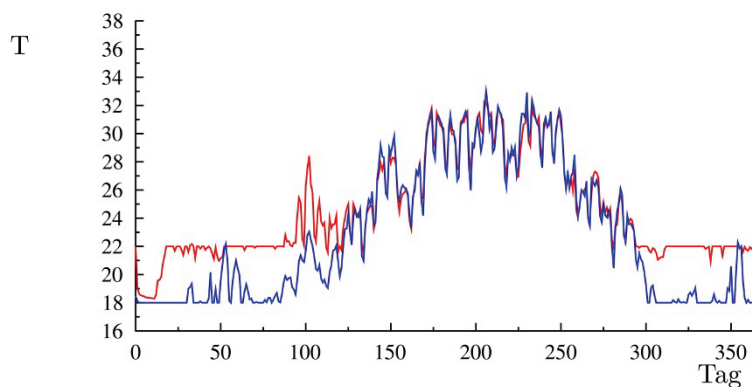


Abb. 2 Simulierter Temperaturverlauf eines Gebäudes in Stuttgart um 08:00 Uhr mit konventioneller Heizungsregelung (blau) und selbstlernender Heizungsregelung (rot)

Eine Darstellung des Ergebnisses ist in Abb. 2 gezeigt. Dargestellt ist die Temperatur zum Zielzeitpunkt  $t_0$  (8 Uhr morgens) über ein Jahr. Die angestrebte Zieltemperatur betrug 22 °C. Blau dargestellt ist eine konventionelle Heizungsregelung, deren Heizphase um 8 Uhr morgens beginnt, sofern die Zieltemperatur nicht ohnehin erreicht ist, und um 18 Uhr abends endet. Außerhalb dieser

Zeit läuft die Heizung nur, wenn die Temperatur unter 18 °C fällt. Rot dargestellt ist die Temperatur bei Regelung der Heizung auf der Basis des in diesem Projekt entwickelten selbstlernenden Algorithmus. Man erkennt, dass zu Beginn der Simulation die rote Kurve deutlich unterhalb der Zieltemperatur verläuft. Nach einer kurzen Lernphase jedoch sind die Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  ausreichend genau bekannt und die Temperatur um 8 Uhr beträgt fast durchweg genau die Zieltemperatur. Mit dem Steigen der Außentemperaturen im Frühjahr und Sommer wird diese Temperatur bereits ohne Heizen überschritten. Im daran anschließenden Herbst und Winter hingegen greift wieder die selbstlernende Heizungsregelung und die Innentemperatur um 8 Uhr beträgt die angestrebten 22 Grad. Dieser vielversprechende neue Ansatz hat sich in der Entwicklungsumgebung bewährt und soll demnächst in der Praxis getestet und auf andere Anwendungsfälle übertragen werden.

### **3 Wetterprognosen**

Der Empfang von Wetterprognosen erfolgt meist per FTP-Download von einem Server des liefernden Wetterdienstleisters. In wenigen Einzelfällen kann schon ein Webservice genutzt werden, also ein direkter Datenbankzugriff über eine Internetverbindung. Es gibt jedoch Fälle, in denen die Gebäudetechnik nicht über eine Internetverbindung erreichbar sein soll, vor allem aus Gründen der Sicherheit. Aus diesem Grund wurde ein neues Verfahren für die Übertragung von Wetterprognosen entwickelt.

#### **3.1 Wetterprognosen mit Langwellenfunktechnik**

Die Projektpartner der Firma HKW Elektronik GmbH haben ein System "Meteotime I" entwickelt, mit dem die Übertragung von Wetterprognosedaten mittels Langwellenfunk möglich ist. Hierfür wurde bisher der Zeitzeichensender DCF77 genutzt. Mit diesem System können jedoch nur kleine Datenmengen für Wetterstationen im Consumerbereich übertragen werden, die für die meisten professionellen Anwendungen in Gebäudeautomation oder Energiemanagement nicht ausreichend sind. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Technologie zum System "Meteotime II" weiterentwickelt um größere Datenmengen übertragen zu können. Dadurch wird es möglich, mehr und höher aufgelöste Wetterprognosen anzubieten. Die wesentlich höhere Bandbreite wird vor allem durch die Nutzung dreier Langwellensender der Europäischen Funkrundsteuerung GmbH möglich, die für Energiemanagement und Datendienste im Einsatz sind. Nebenbei wird das mögliche Versorgungsgebiet durch die neuen Sender erheblich erweitert.

Für den Empfang am Gebäude ist ein kompaktes und preiswertes Empfangsmodul auf der Basis eines Funkuhrenempfängers entwickelt worden. Für die Schnittstelle zur Gebäudeautomation wurde der Modbus Standard gewählt, ein einfaches und weit verbreitetes Protokoll mit geringem Installationsaufwand.

Aufgrund von Verzögerungen in der Beschaffung von Prognosedaten konnten während der Projektlaufzeit keine stündlich aufgelösten Vorhersagen bereitgestellt werden. Ersatzweise wurde der Temperaturgang aus Tagesmaximum und -minimum für vier Tage interpoliert. Die Umstellung auf

höher aufgelöste Daten ist jedoch vorbereitet und mit der entwickelten Sende- und Empfängertechnologie problemlos möglich.

### **3.2 Korrekturverfahren von Wetterprognosen durch Vor-Ort-Messungen**

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich das lokale Mikroklima eines Standorts je nach Umgebungsbedingungen auch bei geringen Ortsänderungen deutlich verändern kann. Da das Raster für die Vorhersagegebiete nicht beliebig verkleinert werden kann, ist ein Verfahren entwickelt worden um die Prognosen, die immer für ein größeres Gebiet gelten, an den jeweiligen Standort eines Gebäudes anzupassen, beziehungsweise zu optimieren. Hierfür werden lokale Wettermessungen in unmittelbarer Nähe des Gebäudes herangezogen. Verschieden Algorithmen sind in umfangreichen Simulationen getestet worden. Die besten Ergebnisse wurden mit dem sogenannten Langzeitkorrekturverfahren erzielt, das daraufhin im Empfänger programmiert worden ist. Bei diesem Verfahren benötigt das System eine Anlern-Phase, in der sich die Genauigkeit der ausgegebenen Prognose-Werte im Laufe der Zeit immer weiter verbessert. Die am Empfänger eintreffenden Wetterprognosewerte werden mit den lokal gemessenen Daten verglichen. Aus der Differenz werden Korrekturwerte berechnet, die eine deutliche Verbesserung der Prognosen ermöglichen. Für die praktische Erprobung und Auswertung ist ein Langzeit-Feldtest erforderlich. Im Rahmen des Projekts konnte dies nicht mehr umgesetzt werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen helfen Anpassungen am Algorithmus des Korrekturverfahrens durchzuführen, um weitere Verbesserungen des Systems zu erzielen.

## **4 Umsetzung Prädiktiver Verfahren in der Gebäudeautomation**

Die Gebäudeleittechnik der Firma Wonderware ist vom Projektpartner FMSbase.com erweitert und für den Einsatz moderner prädiktiver Algorithmen vorbereitet worden. Es ist ein Fuzzy Logik System programmiert worden, das es ermöglicht Fuzzy-Regelungen oder auch Fuzzy-Expertensysteme zu realisieren. Weiterhin ist ein Multiples Lineares Regressionsverfahren implementiert worden mit dem die Modellbildung für prädiktive Verfahren möglich wird. Die Wetterprognosen des Langwellenfunkempfängers werden über eine serielle Schnittstelle direkt in die speicherprogrammierbare Steuerung der Gebäudeautomation eingelesen.

Der unmittelbar im Anschluss an dieses Projekt geplante praktische Einsatz der entwickelten prädiktiven Automationsverfahren und der Langwellenempfang der Wetterprognosen mit Vor-Ort-Korrektur ließen sich aus organisatorischen Gründen nicht verwirklichen. Ein Langzeittest des Wetterempfangs ist jedoch in Vorbereitung, die prädiktiven Algorithmen werden in verschiedenen Projekten Anwendung finden.