

Prädiktive Regelungen und Wetterprognosen in der Gebäudeautomation – Überlegungen im Vorfeld zweier Forschungsprojekte

Im SGA-ASSPA-SSAC Bulletin Nr. 57 wurde über zwei Forschungsprojekte berichtet, bei denen es um die Verwendung von prädiktiven Regelungen und Wetterprognosen in der Gebäudeautomation ging: das Forschungsprojekt zur Gebäudeautomation in der Neuen Monte Rosa-Hütte [1] und das Forschungsprojekt OptiControl [2]. In vorliegenden Aufsatz werden einige Überlegungen aus dem Vorfeld der beiden Projekte dargestellt. Diese wurden bereits in [3], [4] und [5] präsentiert. In diesem Aufsatz sind nicht alle Überlegungen, die in [3], [4] und [5] präsentiert wurden, wiedergegeben, dafür sind einige Ausführungen hier in einem Detaillierungsgrad wiedergegeben, wie sie damals nur in der mündlichen Präsentation dargelegt wurden.

Der Nutzen ist offensichtlich! Das Atrium im Bürogebäude Grafenau

Das Bürogebäude Grafenau in Zug aus den frühen 1990er Jahren, ein damals wegen seiner innovativen Gebäudetechnik stark beachtetes Gebäude [6], enthält drei Atrien (eines ist in Abbildung 1 von aussen zu sehen).

Die Atrien haben keine Arbeitsplätze, sondern dienen als Durchgangszonen, hie und da auch für Ausstellungen. Sie werden auch nicht beheizt oder klimatisiert. Zur Beeinflussung des Klimas enthalten sie Markisen im Dachbereich und Lüftungsklappen auf verschiedenen Höhen (in Abbildung 2 sichtbar). Markisen und Lüftungsklappen werden automatisch durch das Gebäudeautomationssystem gesteuert. Das Ziel dieser Steuerung bzw. Regelung besteht darin, im Atrium ein moderates Klima zu erzeugen, das heisst, im Sommer soll es kühler und im Winter wärmer sein als ausserhalb des Gebäudes. Das reduziert die Kühl- und Heizlast in den angrenzenden Büros. Um dieses Ziel zu erreichen, bestimmt die Steuerung in jedem Abtastintervall zuerst, ob der Betriebsmode REJECT oder COLLECT sein soll. Im Betriebsmode REJECT werden dann Markisen und Lüftungsklappen so gestellt, dass es im Atrium möglichst kühl wird oder bleibt, und im Betriebsmode COLLECT aber so, dass es im Atrium möglichst warm wird oder bleibt. An einem heissen Sommertag wählt die Steuerung den Betriebsmode REJECT und an einem kalten Wintertag COLLECT. Das leuchtet sofort ein.

Ziel der Regelung:

Erzeugen eines moderaten Klimas im Atrium. Das reduziert die Heiz- und Kühllast in den umliegenden Büros.

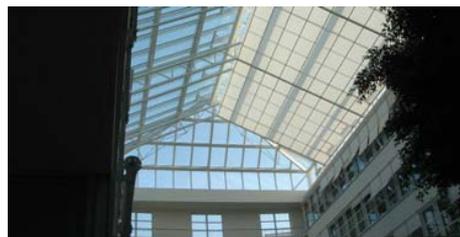
Regelstrategie:

Heisser Sommertag → Betriebsart REJECT (GA-System steuert Markisen und Lüftungsklappen so, dass die Temperatur im Atrium so tief wie möglich ist)

Kalter Wintertag → Betriebsart COLLECT (GA-System steuert Markisen und Lüftungsklappen so, dass die Temperatur im Atrium so hoch wie möglich ist)

Zwischensaison & warmes sonniges Wetter vorhergesagt → Betriebsart REJECT

Zwischensaison & kaltes bewölktes Wetter vorhergesagt → Betriebsart COLLECT



Kontakt

Jürg Tödtli, Dipl. El. Ing.
ETH/SIA, Dr. sc. techn.

Consulting Jürg Tödtli
Hardeggstrasse 21
CH-8049 Zürich

Bis 2009:
Leiter Forschung Europa
Division HVP
(heute Division CPS, Control Products and Systems)
Siemens Building Technologies

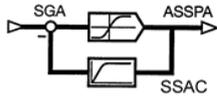


Abbildung 1:
Das Bürogebäude Grafenau in Zug
(Quelle: Referat [4])

Abbildung 2:
Markisen und Lüftungsklappen im Atrium des Bürogebäudes Grafenau
(Quelle: Referat [4])

© Siemens Switzerland Ltd. 2007.
All rights reserved

Aber was wählt nun die Steuerung an einem Tag der Zwischensaison (Frühling oder Herbst)? Ich habe in den 1990er Jahren viele Führungen durch das Gebäude gemacht, für Fachleute und interessierte Laien.



Wenn ich im Atrium die Steuerung bis zu diesem Punkt erklärt hatte und die Frage nach dem Betriebsmode in der Zwischensaison stellte, kam es oft vor, das jemand spontan äusserte: das kommt auf die Wetterprognose an. Ist warmes Wetter vorhergesagt, soll die Steuerung REJECT wählen, wird kaltes Wetter vorhergesagt, dann COLECT.

Was zeigt diese Story? Es ist für viele Leute – auch Laien – **offensichtlich**, dass die Verwendung von Wetterprognosen in der Gebäudeautomation nützlich sein kann.

Wie gross aber der Nutzen einer solchen Verwendung von Wetterprognosen in der Gebäudeautomation wäre, zum Beispiel der Beitrag an die Reduktion des Jahresenergieverbrauchs, ist eine Frage, die eine umfangreichere Analyse erfordern würde. Eine solche wurde für diesen Fall nie ausgeführt. Es soll hier auch nicht verschwiegen werden, dass die Steuerung des Atriums im Bürogebäude keine Wetterprognosen verwendet. Es gab damals noch keine geeignete Dienstleistungen der Wetterdienste. Der Betriebsmode wird auf Grund von Aussentemperaturtrends, die aus momentanen und vergangenen Messwerten bestimmt werden, ermittelt. Es soll auch nicht verschwiegen werden, dass diese auf den Betriebsmodi REJECT und COLLECT basierende Steuerung erst einige Jahre nach der Inbetriebnahme des Gebäudes eingeführt wurde, im Rahmen einer Betriebsoptimierung. Gründe für die Einführung waren der Wunsch nach einem besseren und plausibleren Verhalten der in ihrer Wirkung gut sichtbaren Steuerung, und man dachte auch an eine allfällige spätere Einbindung von Wetterprognosen.

Als positiv vermerkt soll eine späte Wirkung der Atriumssteuerung erwähnt werden: Die Verwendung der Betriebsmodi REJECT und COLLECT der Atriumssteuerung inspirierte die Entwicklung der prädiktiven regelbasierten Steuerungen im Forschungsprojekt OptiControl: sie verwenden die Betriebsmodi UNLOAD und LOAD, die sich auf das Laden und Entladen der sogenannten thermischen Masse (Gebäudemasse als thermische Energiespeicher) beziehen.

Einspeisen von Wetterprognosen in die Gebäudeautomation: Regelungen von TABS zeigen, dass es funktioniert

Heute stellen Wetterdienste auf dem Internet Wetterprognosen in einer Form zur Verfügung, die sich für automatische Auswertungen in einem Gebäudeautomationssystem eignen. Dass Gebäudeautomationssysteme schon seit längerer Zeit in der Lage sind, regelmässig solche Wetterprognosen von einem Wetterdienst automatisch zu empfangen und für die Regelung und Steuerung von gebäudetechnischen Anlagen zu verwenden, zeigen das Hochhaus Haggenholzstrasse (ehemals «Sunrise-Tower») und das Bürogebäude Leonardo, beide in Zürich Seebach (siehe Abbildung 3). Bei ihnen werden die Wetterprognosen für die Regelung der thermoaktiven Bauteilsysteme (TABS) verwendet. Anstatt wie bisher die Vorlauftemperatursollwerte abhängig von momentanen und vergangenen Messwerten der Aussentemperatur zu verstellen, werden sie abhängig von vorhergesagten Aussentemperaturen verstellt. Begründet wird diese Neuerung mit der grossen thermischen Trägheit der TABS: Die Raumtemperaturen reagieren nur langsam auf Regeleingriffe.



Regler für thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) verwendet Wettervorhersage von MeteoSwiss

Etablierte Praxis:

Vorlauftemperatur ändert mit der **gemessenen** Aussentemperatur

Neue Option (umgesetzt):

Vorlauftemperatur ändert mit der **Eintages-Vorhersage** für die Aussentemperatur

Begründung für Einbezug der Vorhersage:

Wegen der grossen thermischen Masse der Decken reagiert die Temperatur sehr langsam auf Regeleingriffe.

Abbildung 3:
Hochhaus Haggenholzstrasse (ehemals: Sunrise Tower rechts) und Leonardo Bürogebäude, beide im Quartier Seebach, Zürich links
(Quelle: Referat [4])
© Siemens Switzerland Ltd. 2007.
All rights reserved

Die Idee, die gemessene Aussentemperatur durch eine prognostizierte Aussentemperatur zu ersetzen, ist bei herkömmlichen Regelverfahren für TABS, aber auch bei neueren möglich, zum Beispiel bei dem damals im Rahmen eines Forschungsprojektes der Siemens, der Empa und der HSLU entstehenden Regelverfahren «TABS-Control» (ausführliche Darstellung der fertigen Lösung in [7]).

Modellprädiktive Regelungen sind heute machbar – der modellprädiktive Heizungsregler

Siemens Building Technologies hatte einen Algorithmus zur modellprädiktiven Regelung einer Gebäudebeheizung entwickelt [8] [9] und als Prototyp in einer Automatisierungsstation Desigo PX implementiert. Dieser Regler eignet sich dazu, die prinzipielle Funktionsweise einer modellprädiktiven Regelung zu erklären (siehe Abbildung 4). Der Regler berechnet periodisch - beispielsweise im Viertelstundentakt – den Verlauf des Vorlauftemperatursollwertes über einen Optimierungshorizont von drei Tagen, so dass die gewünschte Raumtemperatur während dieser Zeit mit minimalem Energieverbrauch erreicht werden kann. Der so berechnete Verlauf des Vorlauftemperatursollwertes (in Abbildung 4 Vorlauftemperaturprofil genannt) wird dann bis zum nächsten Takt, in unserem Beispiel also während 15 Minuten angewandt. Dann wiederholt sich der Vorgang. Für die zu jedem Taktzeitpunkt durchzuführende Optimierungsrechnung wird sowohl ein Modell des thermischen Verhaltens des Gebäudes und der Anlage (daher die Bezeichnung «Modellbasiert») als auch eine Prognose der Aussentemperatur über den Optimierungshorizont verwendet. Der Regler steht in zwei Varianten zur Verfügung: bei einer werden die Parameter (Parameter des Modells) manuell eingegeben, wo bei man auf benutzerfreundliche Eingabe achtete, und bei der andern werden sie automatisch ermittelt (was einen oder mehrere zusätzliche Sensoren erfordert, für die Erfassung einer repräsentativen Raumtemperatur).

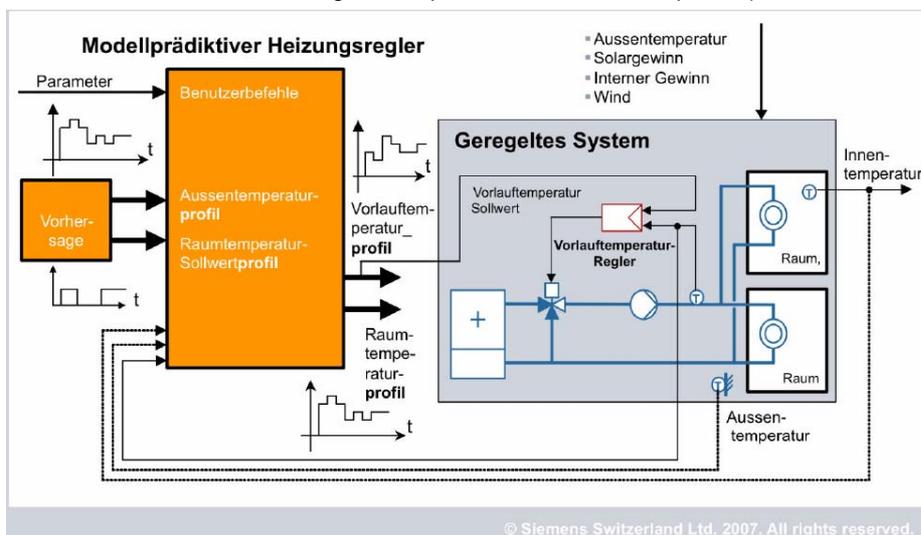
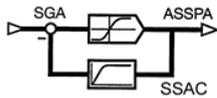


Abbildung 4:
Modellprädiktiver Heizungsregler
(Quelle: Referat [4])

Diese modellbasierte prädiktive Regelung ist eine Alternative zur klassischen aussentemperaturgeführten Heizungsregelung, bestehend aus Heizkennlinie, Zeitschaltprogramm mit Start-Optimierung und aussentemperaturgeführter Heizfreigabe. Sie hat folgende Vorteile: 1. Komfort mit minimalem Energieverbrauch, 2. einfaches Tuning (mit der selbsteinstellenden Variante steht eine volladaptive Heizungsregelung zur Verfügung), 3. leichte Verständlichkeit, 4. automatischer Umgang mit Ausnahmesituationen (z.B. die automatische Abschwächung oder Vermeidung von Nacht- oder Wochenendabsenkungen an sehr kalten Tagen bei nicht überdimensionierten Wärmeerzeugern) und 5. die Möglichkeit einfacher Erweiterungen und Anpassungen zur Verwendung in anderen Anwendungen. Generell haben modellprädiktive Regler gegenüber andern rechenaufwendigen Regelalgorithmen den Vorteil, dass ihre Idee und die prinzipielle Funktionsweise auch ohne Mathematik leicht verstanden werden kann.



Die Funktion wurde zunächst in Simulationen mit gemessenen Wetterdaten und später in zwei Alphatests in realen Gebäuden validiert. Mit der Implementation der Regelung in der Automatisierungsstation Desigo PX wurde der praktische Beweis erbracht, dass die Rechenkapazität der in solchen Geräten verwendeten Prozessoren für solche rechenintensive Optimierungen genügt. Inzwischen steht dieser modellprädiktive Heizungsregler als Standard-Funktion für die Automatisierungsstation Desigo PX zur Verfügung. Nach meinem Wissen war dies in der Gebäudetechnik das erste mal, dass eine Firma einen modellprädiktiven Regler als Standardlösung in ihrem Sortiment anbot.

Vielversprechender Nutzen: Die integrierte Raumautomation

Ermutigt durch die sich abzeichnenden positiven Ergebnisse bei der modellprädiktiven Heizungsregelung, beschlossen wir damals bei Siemens, weitere Anwendungen in Angriff zu nehmen. Wir suchten nach Beispielen, bei denen der Nutzen leichter verständlich gemacht werden kann, und bei denen Falschprognosen nicht zur Verletzung von Komfortanforderungen führen. Wir einigten uns auf eine Anwendung bei der damals vieldiskutierten integrierten Raumautomation (IRA), wo Beleuchtung, Sonnenschutzeinrichtungen, Heizung (z.B. über Radiator) und Kühlung (z.B. über Kühldecke) koordiniert gesteuert und geregelt werden (siehe Abbildung 5).

Integrierte Regelung der Heiz- und Kühlsysteme, der Jalousien und der elektrischen Beleuchtung eines Raumes

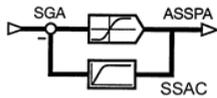


Abbildung 5: Integrierte Raumautomation (Quelle: Referat [4])

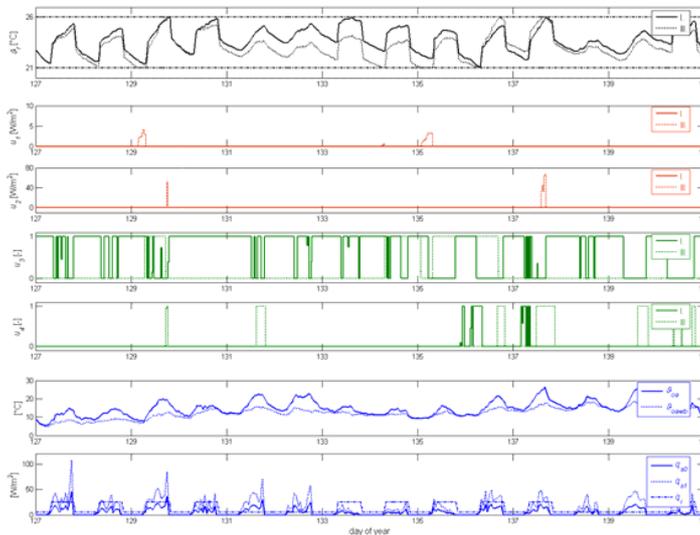
© Siemens Switzerland Ltd. 2007.
All rights reserved

Die Idee war: Abhängig von der Wetterprognose soll die Gebäudemasse (Decken, Böden, Wände) als thermischer Speicher mit «billiger Energie» geladen oder entladen werden, d.h. ihre Temperatur auf ein hohes oder tiefes Niveau gebracht werden, und dies innerhalb des Spielraums, der durch die Komfortanforderungen an die Raumtemperatur gegeben ist, z.B. durch das Komfortband von 21 °C bis 26 °C. Geladen wird, wenn die Wetterprognose auf einen künftigen Heizbedarf hinweist. Als «billige Energie» dienen dabei solare Wärmegegewinne, durch öffnen der Sonnenschutzeinrichtungen, mindestens dann, wenn die Räume nicht belegt sind. Entladen wird, wenn die Wetterprognose auf einen künftigen Kühlbedarf hinweist. Als «billige Energien» dienen dabei die Vermeidung von solaren Wärme-«Gewinnen», durch schliessen der Sonnenschutzeinrichtungen und Kühlen ohne Einsatz der Kältemaschine, allein mit Hilfe des Kühlturms, vor allem während der Nacht. Durch dieses vorausschauende Laden und Entladen der Gebäudemasse spart man in der Folge «teure» Energie zum Heizen und Kühlen, mindestens in den vielen Fällen, bei denen die Prognose eintrifft. Als «teure» Energie wird dabei Wärme aus einem Heizkessel oder einer Wärmepumpe und Kälte aus einer Kältemaschine verstanden.

Da mit den Radiatoren und Kühldecken schnell wirkende Heiz- und Kühlelemente vorhanden sind, handelt es sich bei diesem Beispiel um eine Anwendung, wo unterlagerte schnelle Regelkreise dafür sorgen, dass Falschprognosen nicht zu Komforteinbussen führen. Es wird also erwartet, dass Energiekosten ohne Komforteinbussen eingespart werden können, auch wenn die Wetterprognosen nicht präzise sind.



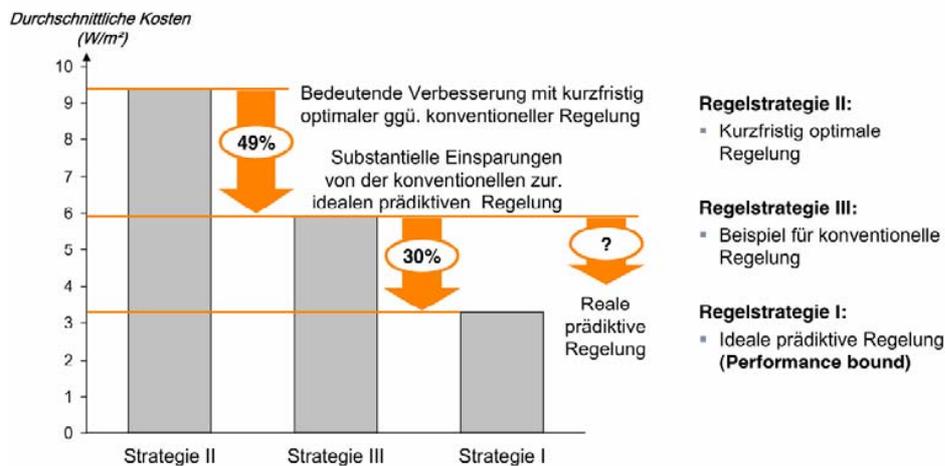
Es wurde ein Algorithmus für einen modellprädiktiven Regler entwickelt. Um eine erste grobe Vorstellung davon zu erhalten, wie gross die jährliche Energie- oder Energiekosteneinsparung bei einer solchen Anwendung sein kann, haben wir Jahressimulationen durchgeführt, wobei wir annahmen, dass die Wetterprognosen ideal sind. Zwei Gründe führten zu dieser Annahme: wir verfügten damals über keine elektronischen Daten zu Wetterprognosen eines vergangenen Jahres; andererseits führt die Verwendung idealer Wetterprognosen zu einem Performance Bound, das heisst zu einem Verhalten, das auch mit den besten real verfügbaren Wetterprognosen nicht übertroffen werden kann. Es wurden auch Jahressimulationen durchgeführt mit einer «konventionellen» Regelung und einer «kurzfristig optimalen» Regelung. Ausschnitte aus einer solchen Jahressimulation sind in Abbildung 6 gezeigt. Erläuterungen dazu findet man in [10]. Durchschnittliche Energiekosten als Mass für die Jahresenergiekosten, wie sie aus den Jahressimulationen ermittelt wurden sind in Abbildung 7 dargestellt. Man erkennt, dass hier ein vielversprechendes Anwendungsgebiet für prädiktive Regler liegt.



Regelstrategie I:
Ideale prädiktive Regelung
(Performance bound)

Regelstrategie III:
Beispiel für konventionelle
Regelung

Abbildung 6:
Integrierte Raumautomati-
on – Simulationsergebnis-
se 1 (Quelle: Referat [4])
© Siemens Switzerland Ltd. 2007.
All rights reserved



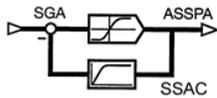
Regelstrategie II:
▪ Kurzfristig optimale
Regelung

Regelstrategie III:
▪ Beispiel für konventionelle
Regelung

Regelstrategie I:
▪ Ideale prädiktive Regelung
(Performance bound)

Abbildung 7:
Integrierte Raumautomati-
on – Simulationsergebnis-
se 2 (Quelle: Referat [4])

Wie gross die Energiekosteneinsparung mit einem nichtidealen prädiktiven Regler, der real verfügbare Wetterprognosen verwendet, ist und wie diese Einsparung vom Gebäudetyp und Standort abhängt, war eine offene Frage, und war eine wesentliche Motivation zur Durchführung des Forschungsprojektes OptiControl [2].



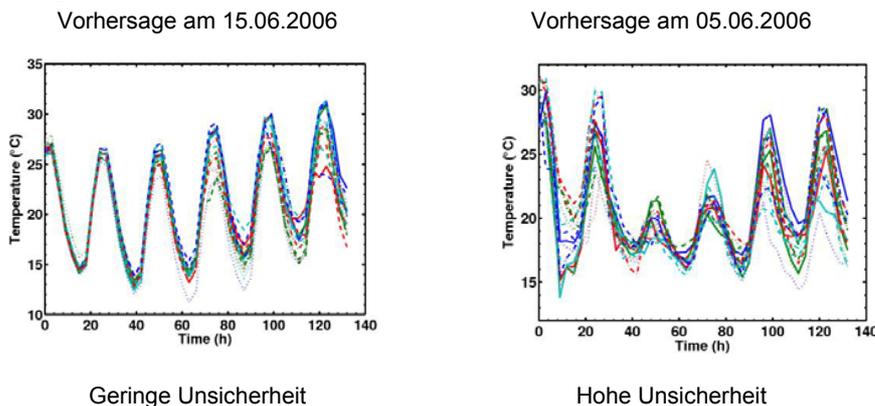
Modellierung von Unsicherheiten in der Wetterentwicklung durch stochastische Modelle - Das legt die Verwendung von stochastischen Regelungen nahe?

Der künftige Verlauf des Wetters ist durch Unsicherheit geprägt. Der klassische mathematische Ansatz zum Umgang mit Unsicherheiten ist die Wahrscheinlichkeitsrechnung. Stochastische Verfahren zur prädiktiven Regelung und Steuerung greifen auf verschiedene Weisen auf die Wahrscheinlichkeitsrechnung zurück, entweder in dem sie Wahrscheinlichkeitsmodelle verwenden, die den künftigen Wetterverlauf beschreiben, oder in dem sie Elemente der Wahrscheinlichkeitsrechnung benutzen, welche die Unsicherheit von Wetterprognosen charakterisieren.

Dass Wetterprognosen verschiedene Unsicherheiten haben können, zeigt Abbildung 8. Sie zeigt zwei Prognosen der Aussentemperatur über 6 Tage für Zürich Kloten mit COSMO-LEPS (LEPS = Local Ensemble Prediction System), jene vom 15. Juni 2006 und eine vom 5. Juni 2006. LEPS liefert nicht nur einen Verlauf der künftigen Aussentemperatur, sondern ein ganzes Ensemble von möglichen Verläufen, und damit auch eine Information über die Unsicherheit der Prognose. Es ist leicht erkenntlich, dass die Prognose vom 15. Juni für die ersten zwei Tage eine kleine Unsicherheit aufweist, jene vom 5. Juni hingegen eine grosse. Da die Unsicherheit der Prognose also von Wetterlage zu Wetterlage sehr verschieden sein kann, liefern einige Wetterdienste Zusatzinformationen, die etwas über diese Unsicherheit aussagen. Diese Information könnte von einer intelligenten Steuerung zum Beispiel dazu genutzt werden, das Risiko von Diskomfort in den Räumen klein zu halten, in Anwendungen, wo die Auswirkung einer Falschprognose auf das Raumklima nicht wie in der oben dargestellten IRA Steuerung durch rasch wirkende unterlagerte Regelungen kompensiert werden.

Stochastische Regelverfahren berücksichtigen explizit Unsicherheiten in der Wetterentwicklung und in der Wettervorhersage, unter Anwendung wahrscheinlichkeitstheoretischer Modelle

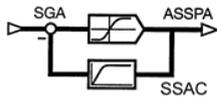
Vorhersage für Zürich Kloten mit COSMO-LEPS (LEPS = Local Ensemble Prediction System)



Diese Methoden können z.B. das Risiko verringern, dass Komfortansprüche missachtet werden in Anwendungen, wo sonst eine unzutreffende Vorhersage zu solchen Missachtungen führen würde.

Abbildung 8:
Stochastische Regelverfahren (Quelle: Referat [4])
© Siemens Switzerland Ltd. 2007.
All rights reserved
Source: MeteoSchweiz

Eine solche Anwendung wäre zum Beispiel die Steuerung der Raumtemperatur in einem Raum mit TABS. Betrachten wir den Heizfall, wo während der Belegung eine Raumtemperatur von 21 °C gefordert wird. Bei kleiner Unsicherheit der Prognose würde die Raumtemperatur so gesteuert, dass ihr Verlauf möglichst tief liegt, aber die 21 °C nicht unterschreitet. Bei grosser Unsicherheit der Prognose würde sie so gesteuert, dass ihr Verlauf einen Sicherheitsabstand zu den 21 °C hat, damit sie im Worst-Case, d.h. bei der tiefsten erwarteten Aussentemperatur die geforderten minimalen 21 °C einhält, dies natürlich auf Kosten eines leicht höheren Heizenergieverbrauchs.



Die Neue Monte Rosa Hütte: Können Wetterprognosen einen Nutzen bringen?

Bei der Planung der Neuen Monte Rosahütte (siehe Abbildung 9) stellte sich die Frage, ob Wetterprognosen bei der Steuerung und Regelung der gebäudetechnischen Anlagen den Treibstoffverbrauch der KWK-Anlage (Kraftwärmekopplungs-Anlage) verringern und damit den Energieautarkiegrad der Hütte verbessern können. Es wurde relativ bald erkannt, dass es im wesentlichen das Ein- und Ausschalten der Kläranlage ist, bei der die Kenntnis der Wetterprognose dazu nützlich ist.

Neue Monte Rosa Hütte.
Ein Projekt der Eidgenössischen
Technischen Hochschule Zürich
(ETHZ) anlässlich ihres 150-jährigen
Bestehens. Mit Beiträgen von Sie-
mens Building Technologies

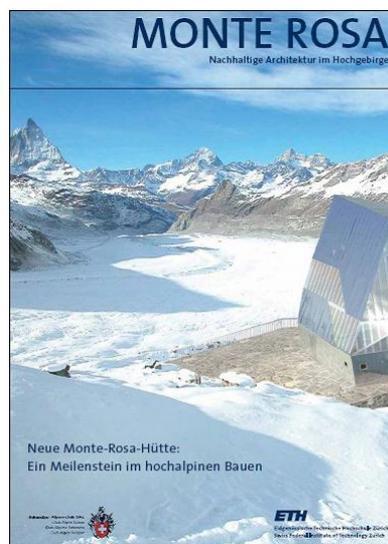
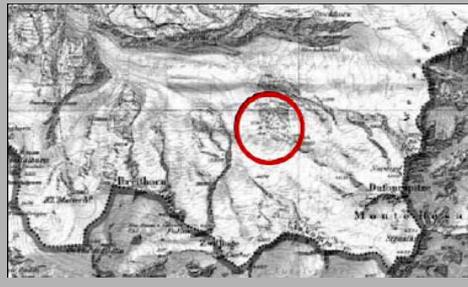


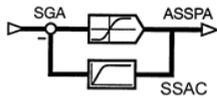
Abbildung 9:
Neue Monte Rosa Hütte
(Quelle: Referat [4])
© Siemens Switzerland Ltd. 2007.
All rights reserved

Folgende Überlegungen führten zu dieser Erkenntnis: Grundsätzlich gibt es bei der Steuerung zwei Teilanlagen, die nicht nach dem unmittelbaren Bedarf ein- und ausgeschaltet werden müssen, sondern bei denen dazu ein Freiheitsgrad besteht, und damit ein Optimierungsspielraum für die Verwendung von Wetterprognosen. Erstens die KWK-Anlage, weil sie auf die beiden Energiespeicher Batterie und Wärmespeicher arbeitet, und die Kläranlage, weil sie das ungeklärte Wasser aus einem Abwasser-Sammelbehälter bezieht und das geklärte Wasser in einen Tank liefert. Bei der KWK-Anlage macht es jedoch – unter der Voraussetzung, dass sie so ausgelegt ist, dass sie den Bedarf an elektrischer und thermischer Leistung immer auch dann bringen kann, wenn beide Speicher (Batterie und Wärmespeicher) «leer» (d.h. auf ihrem niedersten zulässigen Ladezustand) sind - keinen Sinn, sie einzuschalten, bevor einer der beiden angeschlossenen Energiespeicher (Batterie und Wärmespeicher) «leer» ist. Der Grund liegt darin: würde sie jeweils früher eingeschaltet, käme es in der Folge nur häufiger vor, dass einer der beiden Energiespeicher - die Batterie oder der Wärmespeicher - frühzeitig «voll» wäre, und verfügbare Solarenergie nicht gespeichert werden könnte. Somit bleibt nur die Kläranlage als Optimierungsspielraum für die Verwendung von Wetterprognosen. Er ist um so grösser, je grösser die beiden Tanks sind, der vor geschaltete für das ungeklärte Wasser und der nach geschaltete für das geklärte Wasser.

Dass die Verwendung von Wetterprognosen für das automatische Ein- und Ausschalten der Kläranlage einen Nutzen zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs der KWK-Anlage hat (und so zu einem besseren Energieautarkiegrad beiträgt), kann mit einer fiktiven regelbasierten Steuerung verdeutlicht werden.

Eine erste Regel lautet (vgl. auch Abbildung 10):

- **Wenn** die Batterie halb geladen **und** der Abwassertank halb voll **und** für die nahe Zukunft viel Sonnenschein vorhergesagt ist, **dann** löst der Regler den Reinigungsprozess aus, oder fährt ihn fort, falls er schon eingeschaltet ist.



Durch das Auslösen oder Fortfahren des Reinigungsprozesses wird vermehrt elektrische Energie verbraucht, was zu einem tieferen Batterieladezustand beiträgt. Dadurch wird es weniger häufig vorkommen, dass die Batterie in der Folge «voll» geladen wird, uns so die verfügbare Solarenergie nicht aufnehmen kann.

Eine zweite Regel lautet (vgl. auch Abbildung 10):

- **Wenn die Batterie halb geladen und der Abwassertank halb voll und für die nahe Zukunft kein Sonnenschein vorhergesagt ist, dann bricht der Regler den Reinigungsprozess ab, oder lässt ihn ausgeschaltet, falls er schon ausgeschaltet ist.**

Durch das Abbrechen oder Ausgeschaltetbleiben des Reinigungsprozesses wird weniger elektrische Energie verbraucht, was zu einem höheren Batterieladezustand beiträgt. Dadurch wird es weniger häufig vorkommen, dass sich in der Folge die Batterie «ganz leert», und deswegen die KWK-Anlage in Betrieb genommen werden muss, um die andern Energieverbraucher mit Strom zu versorgen.

Die beiden Regeln unterscheiden sich in ihrem Wenn-Teil nur in der Vorhersage der Sonnenstrahlung, nicht aber in momentanen und vergangenen Messwerten. Eine automatische nichtprädiktive Regelung – auch die beste - fällt ihre Entscheidungen ausschliesslich aufgrund von momentanen und vergangenen Messwerten (Benutzereingriffe und Einsatz von Zufallsgeneratoren ausgeschlossen). Sie wird also in den beiden genannten Fällen, die sie nicht unterscheiden kann, die gleichen Steuereingriffe machen. Sie ist also nicht fähig, in beiden Fällen adäquat zu reagieren, d.h. wenn viel Sonnenschein vorhergesagt wird, die Kläranlage laufen zu lassen, und wenn kein Sonnenschein vorhergesagt wird, sie nicht laufen zu lassen.

Dieses Beispiel zeigt also, dass die Verwendung von Wetterprognosen den Treibstoffverbrauch für die KWK reduziert und damit den Energieautarkiegrad verbessert. Die Frage, wie gross diese Verbesserung im Vergleich zur besten nichtprädiktiven Regelung ist, ist damit noch nicht beantwortet. Es ist auch eine anspruchsvolle Frage. Leichter zu beantworten ist die Frage, wie viel der Energieautarkiegrad bei einer bestimmten prädiktiven Regelung im Vergleich zu einer bestimmten nichtprädiktiven Regelung verbessert werden kann. Dazu werden im Forschungsprojekt [1] Simulationen über ein ganzes Jahr durchgeführt.

Das Beispiel in Abbildung 3 von [1] zeigt sehr anschaulich, wie eine prädiktive Regelung bzw. Steuerung prinzipiell funktioniert. Es zeigt aber nicht, dass sie einen Vorteil gegenüber einer nichtprädiktiven Regelung hat, da die zum Vergleich ausgedachte «heuristische Regelung» das Potential einer nichtprädiktiven Regelung nicht ausnutzt.

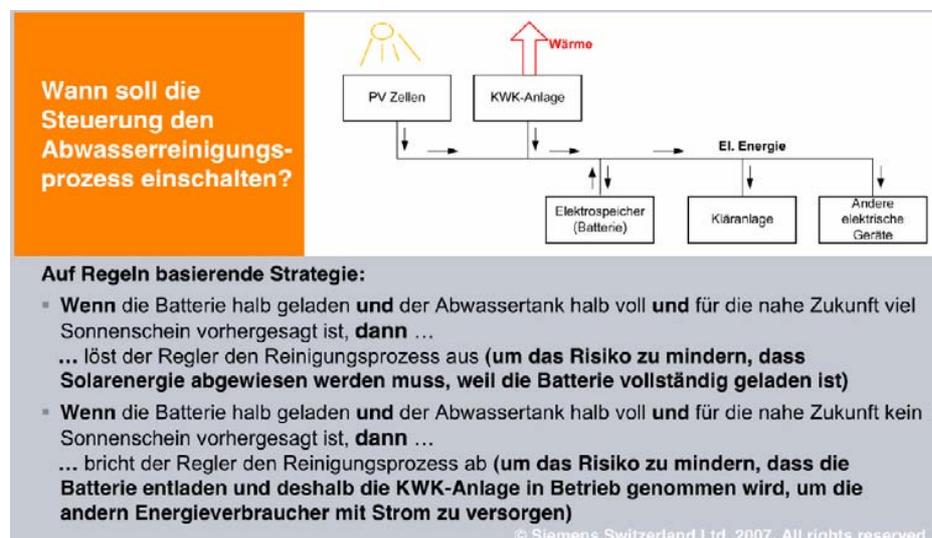
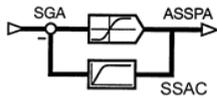


Abbildung 10: Neue Monte Rosa Hütte – Eine fiktive regelbasierte Steuerstrategie (Quelle: Referat [4])



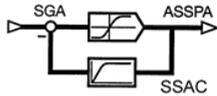
Die Idee ist alt – heute ist die Zeit reif

Bereits in den 1980er Jahren waren prädiktive Regelungen und die Verwendung von Wetterprognosen hier und da ein Thema für die Gebäudeautomation, und es wurden erste Untersuchungen gemacht. In [11] zum Beispiel sind verschiedene Ansätze diskutiert, darunter auch die Anwendung der dynamischen Programmierung und stochastische Regelungen. Zur Untersuchung des Nutzens der Verwendung von Wetterprognosen in der Gebäudeautomation standen noch keine elektronischen Datensätze zu Wetterprognosen aus der Vergangenheit zur Verfügung. Die vergangenen Wetterprognosen mussten aus schriftlichen Dokumenten der damaligen Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA, heute Meteo Schweiz) gelesen und von Hand so codiert werden, dass sie für die Bearbeitung mit dem Computer geeignet waren. Weitere Arbeiten aus jener Zeit findet man in [12] und [13].

In den 1990er Jahren war das Thema der prädiktiven Regelung in der Gebäudetechnik in der Fachliteratur und an Konferenzen schon präsenter. So bildete das Thema im Jahre 1997 an der CLIMA 2000 Konferenz in Brüssel bereits einen Themenschwerpunkt. In [14] findet man eine Beschreibung und kritische Betrachtung der Arbeiten zu diesem Themenschwerpunkt.

Als man die beiden Forschungsprojekte [1] und [2] vorbereitete, konnte man folgende Schlussfolgerungen aus den bis dann angestellten Überlegungen und Untersuchungen ziehen:

- Prädiktive Regelung ist eine vielversprechende Option, weil
 - › eine Verbesserung der Energieeffizienz und des Innenraumklimas in vielen Anwendungen erwartet werden darf;
 - › der Nutzen der Verwendung von Wettervorhersagen für viele Menschen offensichtlich ist;
 - › das Verhalten eines Reglers mit Wettervorhersagen für viele Menschen plausibel ist.
- Als Lösungstypen für die Verwendung von Wetterprognosen zeichneten sich ab:
 - › Regelbasierte Methoden, in der Form «wenn – dann»: Siehe fiktives Beispiel zur Neuen Monte Rosa Berghütte
 - › Ersetzen von Messdaten durch Vorhersagen: siehe Beispiel ‚Regelungen von TABS‘
 - › Modellprädiktive Regelungen: siehe Beispiel Modellprädiktive Heizungsregelung
 - › Stochastische Methoden
- Neben der Entwicklung von Regel- und Steuerstrategien, die Wetterprognosen einbeziehen, ist die Entwicklung weiterer Methoden und Werkzeugen wichtig:
 - › Eine Methode oder ein Tool zur Abschätzung der Auswirkungen des prädiktiven Reglers auf die Energieeffizienz des Gebäudes während der Planungsphase. Dadurch wird eine solche Lösung nur dann eingesetzt, wenn sie dem Kunden in seinem Gebäude einen nachweisbaren entscheidenden Nutzen bringt. Kritische Kunden sind mit Aussagen der Art «bis zu 35 % Energieeinsparungen» nicht zu überzeugen, mit individuell für Ihr Projekt nachgewiesenen 15 % aber schon.
 - › Eine Methode für die Inbetriebnahme des Algorithmus, incl. für das Einstellen ihrer Parameter.
 - › Eine Methode zur Kontrolle der Leistung des geregelten Systems während des Betriebs (zum Nachweis, dass die während der Planung erwartete Leistung erbracht wird).
- Die Zeit ist jetzt gekommen für prädiktive HLK-Regler, weil
 - › preiswerte leistungsfähige Prozessoren verfügbar sind für modellbasierte prädiktive Regler;
 - › leistungsfähige Kommunikationsnetze verfügbar sind;
 - › verlässliche und genaue lokale Wettervorhersagen verfügbar sind;
 - › das Thema ein aktuelles Gesprächsthema ist.
- Und es ist der richtige Zeitpunkt für die Forschungsprojekte [1] und [2], weil
 - › die Zeit jetzt gekommen ist für prädiktive HLK-Regler;
 - › bald die ersten statistischen Daten der neu verfügbaren lokalen Wettervorhersagen greifbar sind



Literatur/Referenzen

- [1] Benz M., Fux S., Eberle M.,
«Neue Monte Rosa Hütte – Integrierte Haussysteme für optimale Energie- und Stoffbewirtschaftung», SGA-SSPA-SSAC Bulletin Nr. 57, 2010.
- [2] Gwerder, M.,
«Prädiktive Gebäuderegelung mithilfe von Wetter- und Anwesenheitsvorhersagen: Resultate des Projekts OptiControl», SGA-SSPA-SSAC Bulletin Nr. 57, 2010.
- [3] Tödtli, J. & Gwerder, M.,
«The use of weather forecasts in building automation and control systems: How to use them? What is the benefit?»
Presentation at REHVA World Congress Clima 2007, 10-14 June 2007, Helsinki, Finland, Workshop No. 9, Enhanced use of weather data and forecasts to improve the energy efficiency and indoor environment in buildings (13. Juni 2007).
- [4] Tödtli, J.,
«Aus der Forschung: Verwendung von Wettervorhersagen in der Gebäudeautomation», Referat am Fachpresseforum 2007 der Siemens Building Technologies, Lissabon, 16. Oktober 2007.
- [5] Morari, M. & Tödtli, J.,
«Weather forecasts enhance comfort and save energy»,
Presentation at Smart Energy Strategies 2008 Conference, 8-10 September 2008, ETH Zurich, Switzerland.
- [6] R. Ruch, M. Farner, H. Eicher, J. Tödtli,
«Erfolgskontrolle Grafenau - Schlussbericht»,
Schlussbericht zu einem P+D Projekt im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Juni 1998.
- [7] Tödtli, J., Gwerder, M., Lehmann, B., Renggli, F., Dorer, V.,
«TABS-Control – Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen»,
Faktor Verlag, 2009.
- [8] Gruber, M. Gwerder, J. Tödtli,
«Predictive Control for Heating Applications»,
CLIMA 2000 World Congress, Napoli, September 15-18, 2001.
- [9] P. Gruber, M. Gwerder, J. Tödtli,
«Modellprädiktive Regelung für Heizungsanwendungen»,
SGA - ASSPA - Bulletin, Nr.34 Januar/Februar/März 2002, S. 7-11.
- [10] M. Gwerder, J. Tödtli,
«Predictive Control for Integrated Room Automation»,
8th REHVA World Congress for Building Technologies – CLIMA 2005, Lausanne, 9th-12th October 2005.
- [11] J. Tödtli,
«Optimierungsideen für den Betrieb von HLK-Anlagen»,
Informationstagung des SEV und 55. Tagung der SGA über "Regeltechnik im Energiehaushalt von Gebäuden", Zürich, 29. März 1984.
Gedruckte Version in SGA-Zeitschrift, Vol. 5 (1985), Nr. 1, S. 6-20.
- [12] Grünenfelder, W.J. & Tödtli, J.,
«The use of weather predictions and dynamic programming in the control of solar domestic hot water systems»,
Paper presented at the 3rd Mediterranean Electrotechnical Conference (Melecon), 8-10 Oct. 1985, Madrid, Spain, 5pp.
- [13] Nygard prüfen Nygard-Ferguson, M. & Scartezzini, J.-L.,
«Computer simulation of an optimal stochastic controller applied to passive solar rooms», Energy and Buildings 14(1): 1-7. (1989)
- [14] Tödtli, J.,
«Control», Invited Paper, CLIMA 2000 Conference, Brussels, August 31 – September 2, 1997.