

## Prädiktive Gebäuderegulierung mithilfe von Wetter- und Anwesenheitsvorhersagen: Resultate des Projekts OptiControl

Markus Gwerder

Siemens Building Technologies, 6301 Zug ([markus.gwerder@siemens.com](mailto:markus.gwerder@siemens.com))

Dimitrios Gyalistras

ETH Zürich, Institut für Integrative Biologie, 8092 Zürich ([gyalistras@env.ethz.ch](mailto:gyalistras@env.ethz.ch))

Frauke Oldewurtel

ETH Zürich, Institut für Automatik, 8092 Zürich ([oldewurtel@control.ee.ethz.ch](mailto:oldewurtel@control.ee.ethz.ch))

Beat Lehmann, Katharina Wirth

Empa, Building Technologies, 8600 Dübendorf ([beat.lehmann@empa.ch](mailto:beat.lehmann@empa.ch), [katharina.wirth@empa.ch](mailto:katharina.wirth@empa.ch))

Vanessa Stauch

MeteoSchweiz, 8044 Zürich ([vanessa.stauch@meteoswiss.ch](mailto:vanessa.stauch@meteoswiss.ch))

Carina Sagerschnig

Gruner AG, 4020 Basel ([carina.sagerschnig@gruner.ch](mailto:carina.sagerschnig@gruner.ch))

Zusammenfassung

Abstract

Résumé

Im Projekt OptiControl ([www.opticontrol.ethz.ch](http://www.opticontrol.ethz.ch)) arbeiten Spezialisten der ETH Zürich, der Empa Dübendorf, der MeteoSchweiz, der Gruner AG, Basel, und der Siemens Schweiz AG gemeinsam an der Entwicklung neuer, vorausschauender Regelungskonzepte für Gebäude. Das Ziel ist es, den Energieverbrauch bei niedrigen Investitions- und Betriebskosten zu minimieren, und dabei gleichzeitig den Benutzerkomfort zu erhalten oder zu verbessern, sowie elektrische Lastspitzen zu reduzieren. Im Zentrum des Projekts steht die Anwendung Integrierte Raumautomation (IRA) in Bürogebäuden. Bei dieser geht es um die automatisierte Regelung von Jalousien, Beleuchtung, Heizung, Kühlung und Lüftung einer Gebäudezone oder eines Raums. Die Hauptresultate des Projekts aus der Periode Mai 2007–Juli 2010 werden vorgestellt: (i) Software, Modelle und Datensätze für die gesamtheitliche Regelung und Optimierung von Gebäudesystemen; (ii) neue Algorithmen zur Erstellung möglichst genauer Wettervorhersagen am Gebäudestandort; (iii) vergleichende Analyse von Energieeinsparpotentialen für IRA; (iv) verbesserte regelbasierte IRA Regelungsstrategien; (v) neuartige modellprädiktive Regelalgorithmen; und (vi) Vorbereitung eines Nachfolgeprojekts, mit dem die entwickelten Lösungen an einem repräsentativen Bürogebäude demonstriert werden sollen.

The OptiControl project ([www.opticontrol.ethz.ch](http://www.opticontrol.ethz.ch)) presents a cooperative effort of specialists from the ETH Zurich, Empa Dübendorf, MeteoSwiss, Gruner AG, Basel, and Siemens Switzerland Ltd. The project deals with the development of predictive control technologies for buildings. The goal is to minimize energy use at low investment and operation cost while maintaining or even improving occupant comfort and reducing peak electricity demand. The project focuses on the application Integrated Room Automation (IRA) for office buildings. IRA deals with the automated control of blinds, electric lighting, heating, cooling, and ventilation of an individual building zone or room. Here we report the project's main results from the period May 2007–July 2010: (i) Software, models and data sets for the integrated optimization of buildings and building systems; (ii) new algorithms for delivering as precise as possible hourly temperature and radiation predictions at a building's location; (iii) comparative analysis of energy saving potentials for IRA; (iv) improved non-predictive and novel predictive rule-based IRA control algorithms; (v) a family of entirely new, Model Predictive Control algorithms that allow for integration of uncertain weather forecasts and for the management of peak electricity demand; and (vi) preparation of a follow-up project that aims at the demonstration of the developed technologies in a representative office building.

# 1. Ausgangslage

Durch den Einsatz moderner Gebäudetechnologien wie Wärmepumpen, thermoaktiven Bauteilsystemen, Solaranlagen oder Kühlung durch natürliche oder mechanische Nachtlüftung können der Energieverbrauch und auch die Energiekosten deutlich gesenkt werden. Häufig ergeben sich jedoch komplexe Gesamtsysteme, die unter stark variierenden Randbedingungen (Wetter, Raumbelastung, Energieverfügbarkeit und -preise) betrieben werden müssen. Dies stellt für die Regelung und Steuerung solcher Systeme eine grosse Herausforderung dar: Oft lassen sich solche Anlagen mit herkömmlichen Regel- und Steuerstrategien nur unzureichend betreiben. Um einen effizienten Betrieb zu ermöglichen, sind neue Strategien nötig, welche insbesondere auch Informationen bezüglich der zukünftigen Randbedingungen verarbeiten können.

Im Forschungsprojekt OptiControl (2007–2010, [www.opticontrol.ethz.ch](http://www.opticontrol.ethz.ch)) arbeiten Spezialisten von der ETH Zürich, der Empa, der MeteoSchweiz, der Gruner AG und der Siemens Schweiz AG zusammen, um fortgeschrittene, insbesondere auch vorausschauende Regelungskonzepte zu entwickeln, die es erlauben, den Energieverbrauch solcher Anlagen bei niedrigen Investitionen und Betriebskosten zu reduzieren. Dabei sollen ein hoher Benutzerkomfort gewährleistet und elektrische Lastspitzen reduziert werden.

Die Idee zur Verwendung von Wetter- und/oder von Anwesenheitsvorhersagen in der Gebäudeautomation ist nicht neu und wurde bereits vielfach aufgegriffen (siehe z.B. [1-5]). Dass sich mit der zusätzlichen Information der Vorhersagen die Gebäudeautomation verbessern lässt, ist einleuchtend. Unklar ist, wie gross das Potential tatsächlich ist, und wie gut es sich ausschöpfen lässt. Umgesetzt in realen Gebäuden wurden bisher nur wenige solcher vorausschauenden Gebäudeautomatiken; detaillierte Auswertungen und wissenschaftlich abgestützte Auswertungen und Vergleiche für diese Gebäude sind unseres Wissens nicht verfügbar.

# 2. Vorgehen

Es existieren verschiedene Anwendungen in der Gebäudeautomation, welche vielversprechend sind für die Verwendung von Wetter- und/oder Anwesenheitsvorhersagen. Aus solchen Anwendungen wurde zu Beginn des Projekts eine Auswahl getroffen: Die Integrierte Raumautomation (IRA) in Bürogebäuden und das Management von aktiven Energiespeichern.

In grossem Umfang untersucht wurde schliesslich die integrierte Raumautomation. Diese befasst sich mit der automatisierten Regelung und Steuerung der Jalousien, der Beleuchtung, sowie der Heizung, Kühlung und Lüftung einer Gebäudezone oder eines Raumes. Die IRA deckt eine grosse Palette von Regelungsaufgaben ab, wie sie immer wieder in Gebäuden vorkommen. Im Projekt wurden fünf typische Varianten von Haustechniksystemen genauer untersucht (Abb. 1).

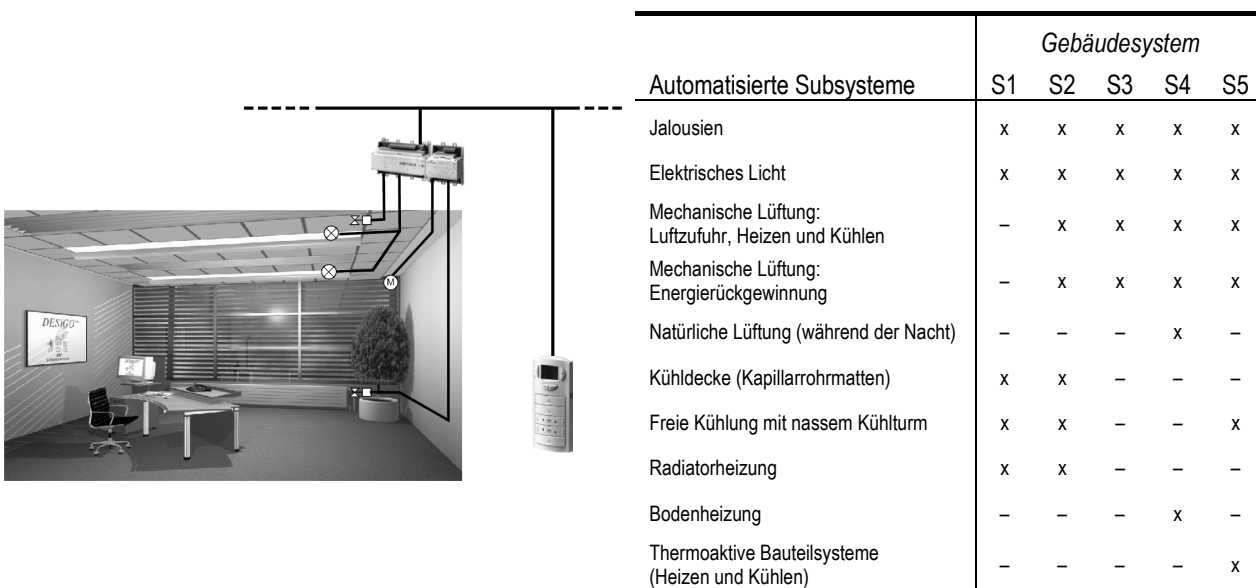


Abb. 1: Rechts: Übersicht über die in OptiControl untersuchten Systeme der IRA; Links: System S1 der integrierten Raumautomation (Regelung/Steuerung von Licht, Jalousien, Radiatoren, Kühldecke).

Für die Anwendung IRA wurde ein Vorgehen gewählt bzw. eine allgemeine Untersuchungsmethodik entwickelt, welche sich auch auf andere Anwendungen übertragen lässt. Die Methodik basiert auf die Verwendung von Computermodellen und -Simulationen. Sie besteht aus folgenden Schritten:

1. Modellierung des Gebäudes und seiner technischen Systeme, inklusive mindestens einer repräsentativen Referenz-Regelstrategie.
2. Ermittlung des sogenannten Performance Bound (PB). Dieser ist definiert als der kleinstmögliche Energieverbrauch (alternativ: kleinstmögliche Energiekosten), der für eine gegebene Situation (definiert durch Standort/Wetter, Gebäude, Haustechniksystem, interne Lasten, Betriebsweisen und Komfortanforderungen) erreicht werden kann. Er stellt analog zum Carnot-Wirkungsgrad für Wärmekraftmaschinen eine theoretische Schwelle für die Güte der Gebäuderegulung dar, die durch keinen Regelalgorithmus unterboten werden kann. Der PB werden mittels mathematischer Optimierung berechnet, z.B. basierend auf dem Verfahren der modellprädiktiven Regelung (Model Predictive Control, MPC).
3. Ermitteln des theoretischen Potentials mittels Simulation. Das theoretische Potential ist gegeben durch die Unterschiede zwischen dem Energieverbrauch sowie der Komfortverletzungen der Referenzstrategie und dem PB über eine repräsentative Periode (z.B. ein Jahr).
4. Bei „genügend grossem“ Potential: Analyse desselben und simulationsbasierte Entwicklung besserer Regelstrategien, mit dem Ziel, das theoretische Potential möglichst gut auszuschöpfen. Bei komplexen Systemen insbesondere Verwendung von MPC Strategien.

Für eine umfassende Dokumentation des Vorgehens – insbesondere auch bezüglich der Auswahl von Anwendungen und dem Vorgehen für die Beurteilung von Regelstrategien – sei auf [6] verwiesen.

### **3. Resultate**

Umfassende Projektergebnisse inkl. allen Veröffentlichungen und Berichten des Projekts sind auf [www.opticontrol.ethz.ch](http://www.opticontrol.ethz.ch) zu finden. In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Projektergebnisse vorgestellt:

- Software, Modelle und Datensätze für die gesamtheitliche Regelung und Optimierung von Gebäudesystemen (Abschnitt 3.1)
- Verfahren zur Korrektur von numerischen Wetterdaten mit lokalen Messdaten (Abschnitt 3.2)
- Verschiedenartige Potentialanalysen zu Energieeffizienz und Komfort für die Anwendung der IRA bezüglich einer Vielzahl an Faktoren, z.B. Regel- und Steuerstrategien, Haustechnik-Systemen, Gebäudetypen, Standort, Komfortvorgaben, Betriebsweisen und Optimierungszielen (Abschnitt 3.3)
- Neu entwickelte regelbasierte Steuer- und Regelstrategien für die IRA (Abschnitt 3.4)
- Neu entwickelte modellprädiktive Steuer- und Regelstrategien für die IRA (Abschnitt 3.5)
- Vorbereitungsarbeiten für ein Nachfolgeprojekt, bei dem die Projektergebnisse an einem Demonstrationsgebäude angewendet werden (Abschnitt 3.6)

#### **3.1 Software, Modelle und Datensätze für die gesamtheitliche Regelung und Optimierung von Gebäudesystemen**

Die im Rahmen von OptiControl verwendeten Gebäude- und Systemmodelle für die IRA mussten die folgenden Anforderungen erfüllen: (i) genügender Detaillierungsgrad, um die Dynamik von Raumtemperatur, Beleuchtungsstärke und CO<sub>2</sub>-Gehalt im Raum korrekt abbilden zu können; (ii) Eignung für MPC; (iii) genügend kurze Rechenzeit, um ausgedehnte Simulationsstudien zu ermöglichen.

Weil bestehende Modelle sich als zu einfach, zu komplex, oder zu wenig flexibel herausstellten, wurden neue Modelle entwickelt. Es handelt sich um bilineare (in den Steuer- und Zustandsgrößen) Modelle zwölfter Ordnung, bei denen die thermischen Prozesse mittels eines

Widerstands-Kapazitäten-Netzwerkes abgebildet werden können (Abb. 2). Neben dem Gebäude selbst wurden die in Bürogebäuden üblicherweise anzutreffenden Gebäudetechniksysteme wie mechanische und natürliche Lüftung, Heizkörper, Bodenheizung, Kühldecken, TABS und adiabate Kühlung (Kühlturm) modelliert (vgl. Abb. 1).

Alle benötigten Datensätze um realistische Simulationen von Gebäudezonen durchzuführen wurden in der neu entwickelten OptiControl Building Systems Database (BuSyDB) zur Verfügung gestellt. Diese beinhaltet Modellparameter für eine grosse Anzahl an Gebäudezonen (mit unterschiedlicher thermischer Isolation, Bauweise, Fassadenausrichtung und Fensterflächenanteilen), sowie verschiedene Varianten für die Systemdimensionierungen, den Energieverbrauch der Subsysteme, den internen Lasten, den Betriebsweisen und den Komfortanforderungen.

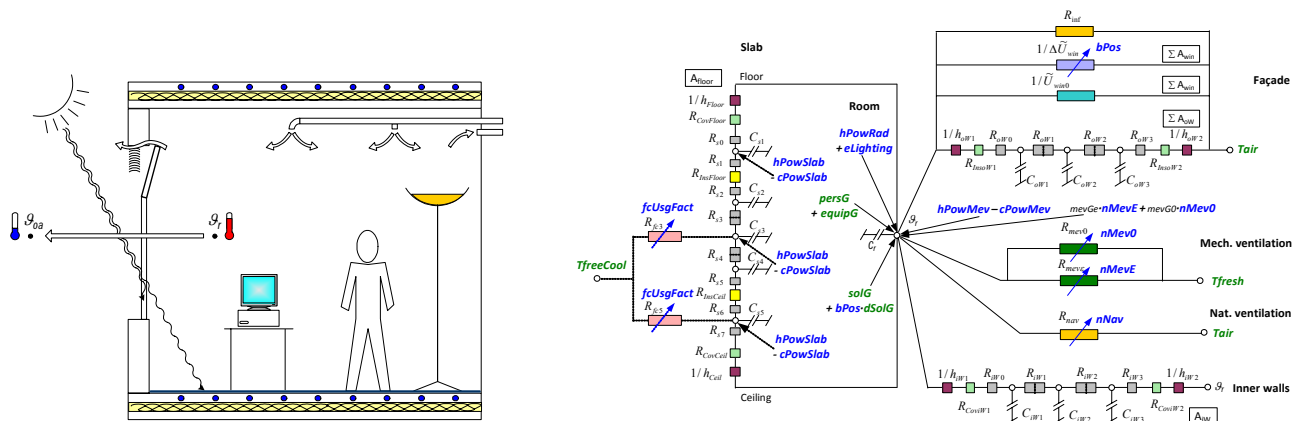


Abb. 2: 1-Zonen Raum-Modul und thermisches Widerstands-Kapazitäten Modell von Gebäude- und Systemkomponenten.

Zwei weitere Bausteine für die Potentialanalyse und die Entwicklung der neuen Regelstrategien waren generische Algorithmen zur Berechnung des PB für bilineare Systeme, sowie die sog. OptiControl Weather and Occupancy Database (OCWDB). Letztere beinhaltet typische Belegungsprofile für Bürogebäude, sowie eine Vielzahl stündlicher Ganzjahresdatensätze mit Wetterdaten und -Vorhersagen für zwölf repräsentative mitteleuropäische Standorte.

Die entwickelten Modelle und Datenbanken wurden in die ebenfalls neu erstellte, auf der MATLAB-Software basierende Modellierungs- und Simulationssoftware BACLab (Building Automation Control Laboratory) integriert. BACLab unterstützt insbesondere eine modulare Arbeitsweise (z.B. schrittweise Hinzufügen neuer Modellvarianten oder Regelalgorithmen), die Durchführung grossangelegter strukturierter Simulationsstudien, sowie die Auswertung deren Resultate.

### 3.2 Anpassung von numerischen Wettervorhersagen an lokale Gegebenheiten

Hochauflösende numerische Wettermodelle sind für die vorausschauende Gebäudeautomation besonders attraktiv, da sie fortwährend Wettervorhersagen auf einem regelmässigen Gitter liefern. Entsprechend können Gebäude beliebiger geographischer Lage automatisch mit Prognosen versorgt werden. Die MeteoSchweiz betreibt das für die alpine Region besonders gut geeignete Modell COSMO ([www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org)) mit einer Maschenweite von 6.6km (COSMO-7) und einer Maschenweite von 2.2km (COSMO-2). Für die Simulationen in OptiControl wurden Vorhersagen von COSMO-7 für einen Vorhersagehorizont von 72 Stunden für verschiedene ausgewählte Standorte in Europa genutzt. Die Prognosen sind als Mittel über eine Gitterbox zu verstehen, das tatsächliche Wetter direkt am Gebäude unterscheidet sich von diesem mittleren Zustand durch die spezifischen Standortbedingungen. Darüber hinaus tragen Modellfehler (die nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen können nicht exakt gelöst werden) und Unsicherheiten in Anfangs- und Randbedingungen der Vorhersagen zu systematischen und zufälligen Abweichungen von den Punktbeobachtungen bei.

Die in OptiControl durchgeführten Simulationsstudien zeigten, dass die Genauigkeit der Vorhersagen für eine energieeffiziente Gebäudeautomation entscheidend ist. Die untersuchten Gebäude reagierten insbesondere sensitiv auf die Vorhersage der einfallenden Strahlung. Im Laufe des Projekts wurden daher anpassungsfähige statistische Verfahren entwickelt, die mit Hilfe von lokalen Messungen die Genauigkeit der Prognosen massgeblich verbessern können. Dabei hat sich ein zweistufiges Verfahren bewährt, das zuerst die Vorhersage über den gesamten Vorhersagezeitraum an lokale Gegebenheiten anpasst [7], und danach jede neue Messung am Gebäude für eine Kurzfristkorrektur nutzt [8]. So können systematische Fehler in den Prognosen gänzlich eliminiert und die Prognoseunsicherheit in den ersten Vorhersagestunden um 10 - 20% reduziert werden [8].

### 3.3 Potentialanalyse für die integrierte Raumautomation

Das theoretische Energieeinsparpotential dank einer perfekten prädiktiven Regelung (PB) wurde für verschiedene Referenzstrategien in einer grossangelegten, systematischen Simulationsstudie untersucht. Dabei wurden die folgenden Faktoren variiert: Standort, Gebäudesystem, thermische Isolation, Fensterflächenanteil, Fassadenausrichtung, Bauweise und interne Lasten.

Die erhaltenen theoretischen Einsparpotentiale wurden dann mit sonst möglichen Einsparungen aufgrund der folgenden relativ kostengünstigen Massnahmen im Zusammenhang mit der Regelung verglichen: die Reduktion des thermischen Komforts ausserhalb der Belegungszeiten, eine generelle Reduktion des thermischen Komforts (breiteres Komfortband), die Einführung einer CO<sub>2</sub>-abhängigen Ventilation, und die Verbesserung der nicht-prädiktiven Regelungsstrategien.

Einige Beispielresultate werden in Abb. 3 gezeigt (für weitere Resultate und nähere Angaben siehe [9]). Ein hervorstechendes Merkmal aller Untersuchungen war die extreme Fallabhängigkeit der Einsparpotentiale. Die grössten theoretischen Potentiale für die prädiktive Regelung wurden für Fälle mit hohen solaren und/oder internen Lasten ermittelt. Schlüsselfaktoren waren die optimale Regelung der Jalousien, der freien Kühlung und der Energierückgewinnung.

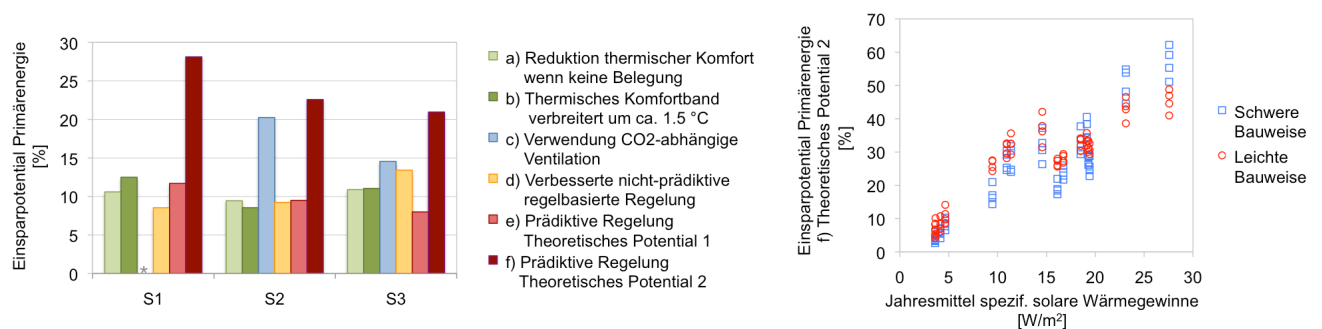


Abb. 3: Links: Vergleich mittlerer Einsparpotentiale für den Jahresverbrauch von nichterneuerbarer Primärenergie. S1–S3: Gebäudesystem; \*: Wert nicht vorhanden; e): Referenzstrategie: nichtprädiktiv regelbasiert, maximale Freiheit für die Jalousienbewegung; f): Referenzstrategie: nichtprädiktiv regelbasiert, Jalousienbewegung stündlich. Angegeben sind Mittelwerte aus Simulationen für einzelne Gebäudezonen an 4 europäische Standorten, thermische Isolation Schweizer Durchschnitt, Fensterflächenanteil 30%, Fassadenausrichtung Nord, Süd, Süd+Ost oder Süd+West (Eckbüros), Bauweise leicht oder schwer, interne Lasten hoch oder niedrig. Rechts: Theoretische Einsparpotentiale für individuelle Gebäudezonen-Fälle für die prädiktive Regelung f) und das Gebäudesystem S2 als Funktion der jahresmittleren spezifischen (Energiedurchlasswert Fenster mal Fensterfläche/Raumfläche) solaren Wärmegewinne.

### 3.4 Regelbasierte Regelung für die integrierte Raumautomation

Heute werden für die IRA praktisch ausschliesslich regelbasierte Regelstrategien verwendet. Eine regelbasierte Regelung legt ihre Steuergrössen mit einer Serie von Regeln der Form „wenn Bedingung dann Aktion“ fest. Typische Komponenten sind Schaltelemente und P(ID) Regler. Auch in den nächsten Jahren werden regelbasierte Regelstrategien vor allem aufgrund ihrer Einfachheit und ihrer Bekanntheit in der IRA weiter eingesetzt werden. Deshalb wurden im Projekt OptiControl neben modellprädiktiven neue regelbasierte Strategien – inklusive zugehörigen Regeln zur Einstellung der Regelparameter – entwickelt und analysiert. Dabei wurden auch vorausschauende regelbasierte Strategien untersucht, welche Wettervorhersagen und Anwesenheitsvorhersagen berücksichtigen.

Abb. 4 vergleicht beispielhaft den durchschnittlichen Primärenergieverbrauch für das Gebäudesystem S2 in Abhängigkeit der Regelstrategie (für weitere Informationen siehe [10]). Pro Regelstrategie sind über 1000 Jahressimulationen mit unterschiedlichen Standorten, Gebäudetypen und Betriebsweisen ausgewertet worden. Dargestellt sind die herkömmliche Regelstrategie RBC-1 und zwei vorausschauende Strategien PRBC-1 und PRBC-2. Zusätzlich ist auch der Performance Bound enthalten. Die Resultate legen nahe, dass mittels einer prädiktiven regelbasierten Regelung erhebliche Einsparungen möglich sind.

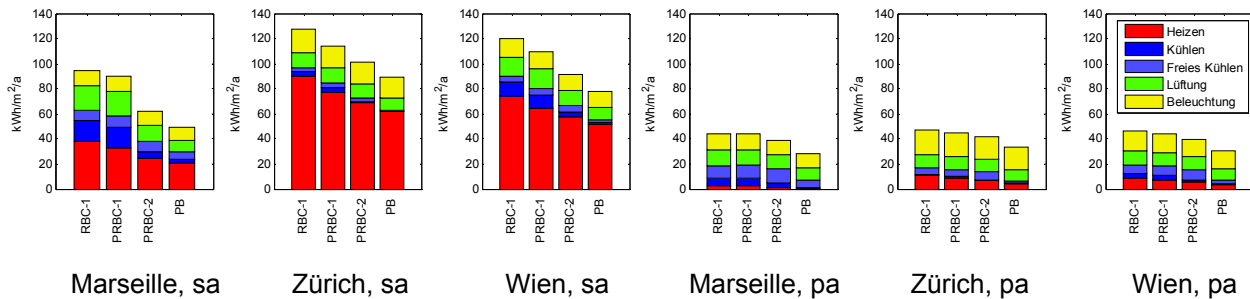


Abb. 4: Durchschnittlicher jährlicher Primärenergieverbrauch für IRA Gebäudesystem S2 abhängig von der Regelstrategie; Heizen (Radiatoren und Lüftung), Kühlen (Kühldecke und Lüftung), Freies Kühlen, Lüftung und Beleuchtung; thermische Isolation Schweizer Durchschnitt (sa) und Passivhaus (pa).

### 3.5 Modellprädiktive Regelung für die integrierte Raumautomation

Die modellprädiktive Regelung (MPC) ist eine sehr einfache und intuitive Methode zum Lösen von Regelungsproblemen mit Beschränkungen. In jedem Abtastintervall wird mit Hilfe eines mathematischen Modells des zu regelnden System ein optimales Regelungsproblem mit endlichem Horizont formuliert und für ein zukünftiges Zeitfenster gelöst. Das Resultat sind Trajektorien der zukünftigen Stellgrößen und Zustände, die die Systemdynamik und die Beschränkungen des Gebäudes (z.B. thermischen Komfort) erfüllen und ein gegebenes Kriterium (z.B. Energieverbrauch) optimieren.

Im Falle der Gebäuderegulation wird zum aktuellen Zeitpunkt ein Plan für alle zu wählenden Stellgrößen für die kommenden Stunden oder Tage formuliert, und zwar basierend auf Wettervorhersagen. Vorhersagen über weitere Störungen (z.B. interne Lasten), sowie Zeitabhängigkeiten der Regelungskosten (z.B. variable Energiepreise) oder der Beschränkungen (z.B. des thermischen Komfortbereichs) können direkt in das Optimierungsproblem mit einbezogen werden. Dann wird der erste Schritt des Regelungsplans auf das Gebäude angewendet, d.h. alle HVAC-, Beleuchtungs- und Jalousieinputs werden gesetzt, bevor das Vorhersagefenster einen Schritt in die Zukunft verschoben und der Prozess beim nächsten Abtastschritt wiederholt wird.

Abb. 5 zeigt beispielhaft, wie die Weitergabe variabler Elektrizitätspreise an einen MPC-Regler dazu verwendet werden kann, um eine Reduktion der elektrischen Lastspitzen zu erreichen (in diesem Fall dank einer Vorverschiebung der Heizphase, für weitere Informationen siehe [11]).

Eine wesentliche Schwierigkeit bei der Anwendung von MPC mit Wetterprognosen für Gebäude ist die Unsicherheit der verwendeten Wetterprognosen. Diesem Problem wurde im Projekt besondere Aufmerksamkeit geschenkt und es wurde ein stochastischer MPC Regler entwickelt, der die Unsicherheiten direkt in der Regelung berücksichtigt [12]. Die entwickelten Strategien wurden für verschiedene Gebäudefälle untersucht und zeigen im Vergleich zu herkömmlichen regelbasierten Strategien weniger Energieverbrauch bei besserem Komfort [13].

Darüber hinaus wurde ein MPC-Regler entwickelt, der die hierarchische Reglerstruktur, wie sie in modernen Gebäudeautomationssystemen anzutreffen ist, berücksichtigt. Dieser sogenannte hybride MPC Regler, der sowohl kontinuierliche als auch diskrete Variablen verarbeiten kann, hat ein Modell sowohl vom Gebäude als auch dem darunter agierenden Regler und zeigt ebenfalls eine verbesserte Performance im Vergleich zu herkömmlichen regelbasierten Strategien.

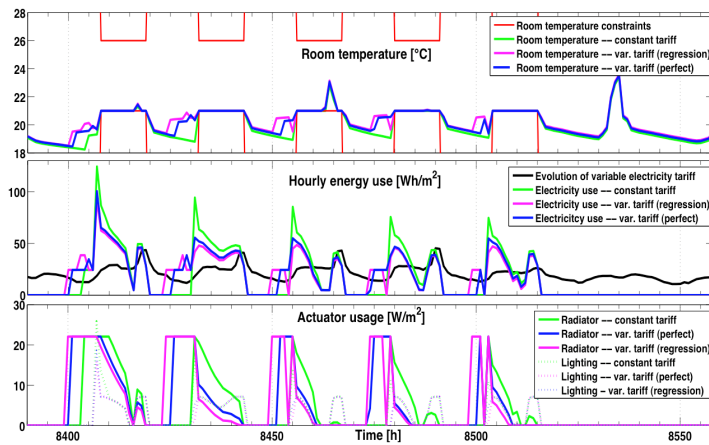


Abb. 5: Beispiel für die Reduktion elektrischer Lastspitzen mittels MPC (Performance Bound Simulationen).  
 Oben: simulierte Raumtemperaturen;  
 Mitte: elektrische Energieverbräuche (farbige Linien) unter Vorgabe verschiedener Elektrizitätstarife, sowie angenommener variabler Elektrizitätstarif (schwarze Linie);  
 Unten: Leistung der Radiatoren und der Beleuchtung. Standort Zürich, dritte Woche im Dez. 2007, thermische Isolation Schweizer Durchschnitt, schwere Bauweise, südorientierte Fassade, Fensterflächenanteil 30%, Gebäudesystem S1, Wärmeerzeugung mittels erdgekoppelter Wärmepumpe.

### 3.6 Vorbereitung des Demonstrationsprojekts

Während das Projekt OptiControl auf umfangreichen Simulationsstudien basierte, sollen im Nachfolgeprojekt OptiControl-II die entwickelten Regelstrategien in einem repräsentativen Schweizer Bürogebäude implementiert werden, um sie unter realistischen Bedingungen zu testen und zu beurteilen.

Das ausgewählte Demonstrationsgebäude befindet sich in der Nähe von Basel. Es wurde 2007 erbaut und ist seitdem störungsfrei und für den Nutzer komfortabel in Betrieb. Es hat 6 Geschosse und eine Bruttogeschossfläche von rund 6'000 m<sup>2</sup>. Die Architektur des Gebäudes ist schlicht, kubusförmig und schnörkellos. Auch die Konstruktion des Massivbaus kann als typisch erachtet werden (Aussendämmung, Wärmeschutzisolierverglasung, rund 50% Glasflächenanteil). Die Heizung und Kühlung erfolgen mittels thermoaktiver Bauteilsysteme (TABS). Eine mechanische Lüftung sorgt für einen hygienischen Luftaustausch. Die Nutzung (durchgehend Standardbüros) ist ebenfalls typisch für ein Administrationsgebäude.

Das zu erwartende Energieeinsparpotenzial wurde bei der Auswahl des Gebäudes mithilfe sorgfältiger Simulationsstudien abgeklärt. Hierzu wurde die gegenwärtig im Gebäude eingesetzte Regelstrategie mit dem Performance Bound verglichen. Insgesamt zeigte sich ein jährliches theoretisches Einsparpotenzial an Primärenergie von mindestens 20%. Das Potential liess sich vor allem auf eine Senkung des Heizenergiebedarfs zurückführen, da die vorausschauende Regelung eine effizientere Nutzung der solaren Wärmeeinträge ermöglicht.

## 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Projekt OptiControl hat wichtige Fragen zum Potential und zur Machbarkeit der vorausschauenden Regelung von Gebäuden beantwortet. Methodisch hat das Projekt wichtige Beiträge an der Schnittstelle von Gebäuden, angewandter Meteorologie, Modellierung und Simulation sowie der Regelungstechnik geliefert. Auch sind aus dem Projekt neuartige Software, Modelle und Datensätze hervorgegangen, die Einzelfallanalysen ermöglichen. Diese sind besonders wichtig, weil das Energieeinsparpotential fortgeschrittener Regelstrategien wie auch der Effekt verschiedener Randbedingungen (z.B. Systemwahl, Komfortanforderungen) auf die Regler-Performance sich als extrem fallabhängig erwiesen haben.

Im Nachhinein lässt sich sagen, dass die wissenschaftliche Untersuchung der prädiktiven Regelung von Gebäuden eine weit grössere Herausforderung darstellt, als dies bei Projektbeginn erwartet wurde. Die Gründe hängen mit der hohen Komplexität und dem grossen Variantenreichtum der untersuchten Systeme zusammen. Es wurden jedoch Methoden und Werkzeuge erarbeitet, die einen strukturierten und systematischen Zugang zu Fragen der Gebäuderegulierung ermöglichen.

Die neu entwickelten Regelstrategien und Methoden für lokale Wettervorhersagen am Gebäudestandort ebnen der Weg zur Entwicklung einer neuen Generation von Reglern, die eine bisher unerreichte Leistungsfähigkeit, Robustheit und Flexibilität aufweisen dürften. Zur Zeit noch laufende Untersuchungen befassen sich mit der Erstellung und Berücksichtigung von Anwesenheitsvorhersagen sowie internen Lasten, der Brechung von Lastspitzen, und der

Robustheit der neuen Regelstrategien. Im Nachfolgeprojekt OptiControl-II sollen die erarbeiteten Lösungen an einem echten Gebäude demonstriert und eine Nutzen/Kosten-Analyse erstellt werden.

Infolge der zunehmenden Dezentralisierung der Energieerzeugung und eines steigenden Anteils erneuerbarer Energien ist in Zukunft mit einer verstärkten zeitlichen Variabilität der Energiepreise und -verfügbarkeiten zu rechnen. Weil vorausschauende Regelungen besser mit solchen Situationen umgehen können als nicht vorausschauende, ist zu erwarten, dass solche Regelstrategien an Bedeutung gewinnen werden. Neben der in OptiControl hauptsächlich untersuchten Anwendung Integrierte Raumautomation sind auch weitere Anwendungen (z.B. verschiedenste Anwendungen zum Management aktiver Speicher) für vorausschauende Regelstrategien prädestiniert und werden in Zukunft untersucht werden.

## 5. Literatur/Referenzen

- [1] Grünenfelder, W.J. & Tödtli, J. (1988). Vorausschauende Steuerungen für solare Brauchwarmwasseranlagen. Paper presented at the 5. Schweizerisches Status-Seminar "Energieforschung im Hochbau", 8-9. Sep. 1988, ETH Zurich, Switzerland, p333-342.
- [2] NEUROBAT Final Report (1998). Predictive Neuro-fuzzy Building Control System. CSEM Neuchâtel, EPF Lausanne.
- [3] Gruber, P., Gwerder, M. & Tödtli, J. (2001). Predictive control for heating applications. Paper presented at the 7th REHVA World Congress (Clima 2000/Napoli 2001), 15-18 Sep. 2001, Napoli, Italy, 15pp.
- [4] Henze, G.P., Kalz, D., Liu, S. & Felsmann, C. (2005). Experimental analysis of model-based predictive optimal control for active and passive building thermal storage inventory. International Journal of HVAC&R Research, 11(2): 189-214.
- [5] Bianchi, M.A. (2006). Adaptive modellbasierte prädiktive Regelung einer Kleinwärmepumpenanlage. PhD Thesis No. 16892, ETH Zurich, Switzerland, 167pp.
- [6] Gyalistras, D. & Gwerder, M. (Eds.) (2009). Use of weather and occupancy forecasts for optimal building climate control (OptiControl): Two Years Progress Report. Terrestrial Systems Ecology ETH Zurich, Switzerland and Building Technologies Division, Siemens Switzerland Ltd., Zug, Switzerland.
- [7] Stauch V.J., Schubiger F., Steiner P. (2010) Local weather forecasts and observations. In: Gyalistras, D., Gwerder, M. (Eds.): Use of weather and occupancy forecasts for optimal building climate control (OptiControl): Two years progress report. Terrestrial Systems Ecology ETH Zurich, Switzerland and Building Technologies Division, Siemens Switzerland Ltd., Zug, Switzerland.
- [8] Stauch, V., Hug, C., Schubiger, F. & Steiner, P. (2010) Weather forecasts, observations and algorithms for building simulation and predictive control – Contributions by MeteoSwiss for the 3rd year of the project OptiControl. Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, Zurich, Switzerland, 14 pp.
- [9] Gyalistras, D., Gwerder, M., Oldewurtel, F., Jones, C.N., Morari, M., Lehmann, B., Wirth, K., & Stauch, V. (2010). Analysis of energy savings potentials for Integrated Room Automation. Paper presented at the 10th REHVA World Congress Clima 2010, 9-12 May 2010, Antalya, Turkey, 8pp.
- [10] Gwerder, M., Gyalistras, D., Oldewurtel, F. et al. (2010). Potential Assessment of Rule-Based Control for Integrated Room Automation. Paper presented at the 10th REHVA World Congress Clima 2010, Antalya, Turkey.
- [11] Oldewurtel, F., Ulbig, A., Parisio, A., Andersson, G. & Morari, M. (submitted). Reducing peak electricity demand in building climate control using real-time pricing and Model Predictive Control. Paper submitted to CDC 2010, 49th IEEE Conference on Decision and Control, December 15-17, 2010, Atlanta, Georgia USA.
- [12] Oldewurtel, F., C.N. Jones, M. Morari (2008). A Tractable Approximation of Chance Constrained Stochastic MPC based on Affine Disturbance Feedback. Paper presented at the 47<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico.
- [13] Oldewurtel, F., Gyalistras, D., Gwerder, M. et al. (2010). Increasing Energy Efficiency in Building Climate Control using Weather Forecasts and Model Predictive Control. Paper presented at the 10th REHVA World Congress Clima 2010, Antalya, Turkey.