

# SIMULATION EINER PRÄDIKTIVEN RAUMTEMPERATURREGELUNG UNTER VERWENDUNG EINER IDEALEN WETTERVORHERSAGE

Gregor Görtler<sup>1</sup>, Barbara Beigelböck<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fachhochschulstudiengänge Burgenland Ges.m.b.H., Pinkafeld, Österreich

<sup>2</sup> A. Porr Allgemeine Baugesellschaft AG, Wien, Österreich

## KURZFASSUNG

Durch die Anwendung von prädiktiven Regelalgorithmen (MPC-Model Predictive Control) für die Raumheizung versprechen sich Errichter und Betreiber eine nennenswerte Energieeinsparung.

Mittels einer Simulation soll für einen ausgewählten Fall das Energieeinsparpotential eines prädiktiven Regelalgorithmus zur Raumtemperaturregelung unter Verwendung einer idealen Wettervorhersage im Vergleich zu gängigen Algorithmen (PI-Regler, Zweipunktregler) abgeschätzt werden.

Als Regelstrecke mit der Regelgröße Raumtemperatur dient ein Raum mit Fußbodenheizung, der in TRNSYS modelliert wurde. Mittels geeigneter Identifikationsmethoden wurde ein lineares Zustandsraummodell der Regelstrecke entworfen, welches vom prädiktiven Regelalgorithmus, der in MATLAB programmiert wurde, verwendet wird. Durch Einbindung eines Referenzwetterdatensatzes aus der TRNSYS-Bibliothek, welcher dem Regelalgorithmus zur Verfügung gestellt wird, sind alle relevanten Wetterdaten bereits im Voraus bekannt (ideale Wettervorhersage).

Für die in diesem Beitrag betrachtete Konfiguration ergab sich ein Energieeinsparpotential von ca. 10 %, pro Jahr bei der Verwendung eines MPC-Reglers verglichen mit einem PI-Regler.

## ABSTRACT

Due to the use of MPC (Model Predictive Control) for room heating applications users and constructors expect nameable energy savings.

By usage of a simulation for a special case the energy saving potential of predictive control algorithm for room temperature control in connection with an ideal weather forecast, in comparison to established algorithms (PI-control, two level controller) is estimated.

The controlled system with the control variable room temperature is a room with floor heating which was modelled in TRNSYS. A linear state space model of the controlled system was derived with suitable identification methods. This model was used by the

predictive control algorithm, which was programmed in MATLAB. The weather data was taken from the TRNSYS library and has been made available also for the control algorithm, so that an ideal weather forecast was established.

For the example considered in this paper, the amount of energy saving was 10% per year with the MPC-controller compared to a PI-controller.

## EINLEITUNG

Energieeinsparungen durch intelligente Regelungen sind in Zeiten des Klimawandels und zunehmend erschöpfter fossiler Ressourcen ein Gebot der Stunde. Einen besonderen Beitrag können moderne Regelsysteme in der Gebäudetechnik leisten, da der energetische Endverbrauch zu einem erheblichen Teil von Raumheizung- und klimatisierung beeinflusst wird. Durch Einbeziehung einer Wettervorhersage und Verwendung eines prädiktiven Regelalgorithmus sollte eine Energieeinsparung gegenüber herkömmlichen Reglern möglich sein. In manchen Fachartikeln, wie z.B. bei Schmid (2008) werden sogar Einsparpotentiale bis zu 40% publiziert.

Durch Simulation einer Raumtemperaturregelung soll für einen ausgesuchten Raum mit Fußbodenheizung versucht werden, Energieeinsparpotentiale sowie Stärken und Schwächen eines prädiktiven Regelalgorithmus abzuschätzen. Alle in diesem Beitrag angeführten Untersuchungen sind im Detail in der Diplomarbeit von Frau Beigelböck (2009) nachzulesen.

## STAND DER TECHNIK

Im Wesentlichen befindet sich die prädiktive Regelung in der Gebäudetechnik noch in der Entwicklungsphase. Käufliche Produkte existieren zwar bereits am Markt, sind jedoch noch wenig etabliert.

Einen kleinen Einblick in bestehende Pilotanlagen zeigen z.B. Bollin (2008) oder Gwerder (2007).

Ein größeres Forschungsprojekt, welches sich mit prädiktiver Regelung und Wettervorhersage beschäftigt, ist das OptiControl-Projekt (2010), bei dem unter Anderem auch die ETH Zürich beteiligt

ist. Das Projekt startete 2007 und läuft über drei Jahre. Auf der Webseite des Projekts wird eine große Anzahl an Artikeln zum Thema MPC und Wettervorhersage im \*.pdf-Format auch zum freien Download angeboten.

## SIMULATIONSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG

### Abgrenzungen

Da eine wesentliche Aufgabe darin bestand, Unterschiede zwischen herkömmlichen und prädiktiven Regelalgorithmen herauszuarbeiten, wurde das Objekt der Betrachtungen möglichst einfach gestaltet. Untersucht wurde in diesem Fall das Temperaturverhalten eines Raumes mit Fußbodenheizung (die wesentlichen Eckdaten des Raumes sind in Tabelle 1 angeführt). Die Regelgröße stellte die Raumtemperatur dar, als Stellgröße wurde die Vorlauftemperatur gewählt (die Wärmebereitstellung wurde daher nicht mitmodelliert). Die Störgrößen stellten lediglich die Außentemperatur und die solare Einstrahlung dar. In der Realität wirken natürlich noch eine Vielzahl anderer Störgrößen, wie z.B. innere Lasten oder Verschattungen, um nur zwei wichtige Faktoren zu nennen.

In der Simulation wurde der Raum nur beheizt, eine Kühlung war nicht vorhanden. Der natürliche Luftwechsel wurde mit  $0,25 \text{ h}^{-1}$  festgelegt, eine mechanische Wohnraumlüftung war nicht vorhanden.

Die Betrachtungen beschränkten sich auf die Vorgänge in der Heizperiode.

Tabelle 1: Wesentliche Daten des Raumes

Grundfläche	30,7 m <sup>2</sup>
Volumen	79,0 m <sup>3</sup>
U-Wert Außenwände	0,3 W/(m <sup>2</sup> K)
Außenwandfläche Ost	20,8 m <sup>2</sup>
Verglasungsanteil Ost	26 %
Außenwandfläche Süd	11,8 m <sup>2</sup>
Verglasungsanteil Süd	50 %

Als Regelalgorithmus wurde ein linearer MPC-Algorithmus aus der Model Predictive Control Toolbox (Bemporad (1995)) von MathWorks verwendet. Der ausgewählte MPC-Algorithmus verwendet ein lineares Zustandsraummodell des Raumes und erlaubt die Vorgabe von Stellgrößenbeschränkungen (constraints) sowie von Gewichtungen (weights) für die Regelgröße und die Stellgröße. Theoretische Hintergründe zur prädiktiven Regelung

zeigen z.B. Bemporad (1995), Dittmar (2004) oder Wang (2009).

Sowohl für die Wetterdaten als auch für die Wettervorhersage wurde derselbe Wetterdatensatz verwendet. Das bedeutet, dass in der Simulation das vorausgesagte Wetter auch immer exakt dem tatsächlichen Wetter entsprach (ideale Wettervorhersage). Dieser Weg wurde gewählt, um das höchstmögliche Potential des verwendeten Algorithmus aufzuzeigen.

### Simulationsumgebung

Abbildung 1 zeigt die Struktur der Simulation im TRNSYS Simulation Studio.

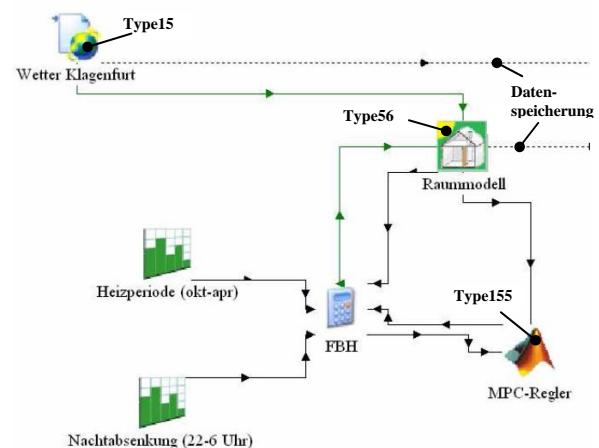


Abbildung 1: Struktur der Simulation in TRNSYS

Der ausgewählte Raum wurde mit dem Simulationsprogramm TRNSYS (2007) mit dem Type56 (multizone building) modelliert. Als Wetterdatensatz wurde der Klimadatensatz von Klagenfurt (Kärnten/Österreich) aus dem Jahr 1995 verwendet, welcher in der TRNSYS Wetterdatenbibliothek verfügbar war.

Für den Regelalgorithmus wurde die Model Predictive Control Toolbox von MATLAB herangezogen. Diese erlaubt es über den Befehl „mpc“ ein MPC-Objekt zu erstellen, welches das (lineare) Regelstreckenmodell, den Prädiktions- und Kontrollhorizont sowie die Beschränkungen (constraints) und Gewichtungen (weights) enthält.

Die Kopplung der Programme TRNSYS und MATLAB erfolgte über den TRNSYS Type155, welcher eine vorprogrammierte Schnittstelle zu MATLAB darstellt. Diese Schnittstelle erlaubt es in jedem Zeitschritt von TRNSYS ein MATLAB-Script aufzurufen, welches dann von MATLAB ausgeführt wird. Als Schrittweite wurden 15 Minuten gewählt.

Aus TRNSYS wird in jedem Zeitschritt die Regelgröße Raumtemperatur an MATLAB übergeben. MATLAB berechnet für jeden Zeitschritt die Stellgröße Vorlauftemperatur und sendet diesen Wert

an TRNSYS zurück. Für das Wetterdatenfile wird in TRNSYS der Weather Data Processor Type15 verwendet. Für MATLAB wurden diese Wetterdaten in ein \*.mat – File konvertiert und so für den MPC-Algorithmus direkt im MATLAB-Workspace zur Verfügung gestellt. Dies war nötig, um eine (ideale) Wettervorhersage simulieren zu können.

Der für Vergleichszwecke herangezogene PI-Regler wurde direkt in TRNSYS mit dem Type23 realisiert.

### Vorgangsweise

Da der prädiktive Regler in MATLAB ein lineares Zustandsraummodell zur Voraussage der Zustandsgrößen benötigt, wurden mit Hilfe einer Identifikation die erforderlichen Parameter bestimmt. Dazu wurde (ausgehend vom Arbeitspunkt) ein PRBS Signal (Pseudo Random Binary Signal) in TRNSYS auf das Raummodell (Type56) aufgebracht und der Verlauf der Raumtemperatur aufgezeichnet. Dabei wurde immer nur eine Größe verändert (z.B. Stellgröße), während die anderen Größen (z.B. Störgrößen) konstant gehalten wurden.

Für die Identifikation in Bezug auf solare Einstrahlung wurde lediglich die Einstrahlung auf die Südwand herangezogen, da sie auf Grund der Orientierung und des Verglasungsanteils des Raumes den weitaus größten Anteil am Temperaturverhalten des Raums hatte. Weiters wurde durch diese Wahl auch die Identifikation vereinfacht.

Mittels eines Least Squares Algorithmus wurden mit Hilfe der MATLAB Identification Toolbox (process model) die zugehörigen linearen Übertragungsfunktionen identifiziert. Das Ergebnis der Identifikation waren drei Übertragungsfunktionen, die das dynamische Verhalten der Raumtemperatur in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur (Stellübertragungsfunktion) und in Abhängigkeit der Außentemperatur sowie der solaren Einstrahlung auf die Südwand (Störübertragungsfunktionen) darstellten. Diese Übertragungsfunktionen wurden schließlich in ein lineares Zustandsraummodell umgewandelt (7x7 Zustandsmatrix).

Da es zur Zeit nur sehr wenige Erfahrungswerte zur Einstellung der Reglerparameter (Horizontlängen, Beschränkungen und Gewichtungen) bei einem MPC-Regler gibt, wurden unterschiedliche Parametrierungen getestet und mittels trial and error sowie Literaturvergleichen die vermutlich geeigneten Parameter festgesetzt (siehe Tabelle 2). Insgesamt wurden aus acht unterschiedlichen Parameterkonfigurationen drei vermutlich geeignete Reglerparametrierungen ausgewählt, wovon eine in diesem Bericht vorgestellt wird.

Für den in TRNSYS modellierten Vergleichsregler wurde ein PI-Regler mit den Reglerparametern  $K_P = 5$  und  $T_n = 4$  h verwendet.

Schließlich wurde mit dem ausgewählten Wetterdatensatz eine Jahressimulation erstellt und die relevanten Daten (Temperaturen, Leistungen etc.) aufgezeichnet und miteinander verglichen.

Tabelle 2: Reglerparameter des MPC-Reglers

Schrittweite	15 min
Prädiktionshorizont	12 h
Kontrollhorizont	5 h
Zielwert der Stellgröße	25 °C
Stellgrößenbeschränkungen	25 – 45 °C
Regelgrößenbeschränkungen	Keine
Stellgrößenänderungsbeschränkungen	± 5 °C/15 min
Gewichtung der Regelgröße	1
Gewichtung der Stellgröße	0,15
Gewichtung der Stellgrößenänderung	0,1

### Simulationsergebnisse

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen das Verhalten des geregelten Systems für ausgewählte Febertage. Diese Febertage wurden gewählt, weil sie die unterschiedlichen Verhaltensweisen der untersuchten Regler besonders deutlich zeigen.

Der Raumtemperatursollwert beträgt 22°C mit einer Nachtabsenkung auf 19°C. Aus Abbildung 2 ist zu erkennen, dass der Raumtemperaturverlauf qualitativ ähnlich verläuft, wobei der Absolutwert der Raumtemperatur mit PI-Regler ca. 1°C über dem Wert mit MPC-Regler liegt. Diese Abweichung ist jedoch nicht ausschließlich auf den unterschiedlichen Regelalgorithmus zurückzuführen, sondern auch durch die Anfangsbedingungen im betrachteten Zeitraum bedingt.

In Abbildung 2 wurden zum einfacheren Vergleich mit der solaren Einstrahlung und den üblicherweise verwendeten Größen nicht die Stellgröße Vorlauftemperatur, sondern die Heizleistung eingezeichnet. Dabei ist deutlich der Unterschied in der Arbeitsweise der beiden Regler zu erkennen. Während der MPC-Regler bereits heizt, bevor der Sollwert der Raumtemperatur von 19 auf 22°C springt (da er die Sollwertänderung bereits im Vorhinein kennt), kann der PI-Regler erst auf eine Abweichung des Istwerts vom Sollwert reagieren. Da auch die solare Einstrahlung durch die Wettervorhersage für den MPC-Regler bekannt ist, nimmt er die Heizleistung wesentlich früher zurück als der PI-Regler. Insgesamt ist im betrachteten Zeitraum auch gut zu erkennen, dass der MPC-

Regler eine geringere maximale Heizleistung aufbringt als der PI-Regler. Am 22. Feber zeigt sich der größte Vorteil des MPC-Reglers. Da durch die Prädiktion der Raumtemperatur deren Verlauf bekannt ist, heizt der MPC-Regler überhaupt nicht, während der PI-Regler auf Grund seines Regelalgorithmus eine Heizleistung aufbringen muss. Generell zeigten sich die größten Vorteile des MPC-Algorithmus dann, wenn die solare Einstrahlung im Verlauf des Tages eine zusätzliche Heizleistung aufbringt. Bei Tagen ohne nennenswerte solare Einstrahlungen waren nahezu keine Energieeinsparungen feststellbar.

Bei den Simulationen zeigte sich, dass die solare Einstrahlung im Vergleich zur Außentemperatur die dominierende Störgröße für das System war. Dies ist bei der betrachteten Konfiguration auf zwei wesentliche Ursachen zurückzuführen:

- Die solare Einstrahlung kann auch während der Wintermonate sehr groß werden, während sich die Außentemperatur in einem relativ gesehen

viel engeren Bereich bewegt. Dadurch beeinflussen sowohl der absolute Leistungseintrag als auch die Schwankungen durch die solare Einstrahlung die Raumtemperatur wesentlich stärker als die Außentemperatur.

- Durch den Aufbau (vor allem durch den Verglasungsanteil der Außenflächen und die gute Wärmedämmung) und die Orientierung des betrachteten Raums, reagiert der Raum auf Änderungen der solaren Einstrahlungen empfindlicher als auf Änderungen der Außentemperatur.

Aus diesen Gründen ist in Abbildung 3 die Außentemperatur auch nicht eingetragen.

Im in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellten Zeitraum ergibt sich eine Heizenergieeinsparung von ca. 17%.

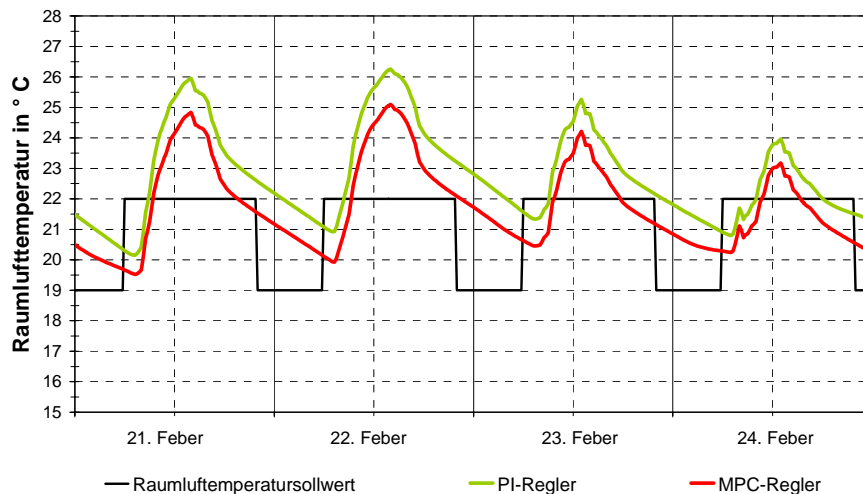


Abbildung 2: Vergleich des Verlaufs der Raumlufitemperaturen der Systeme mit MPC-Regler und PI-Regler für ausgewählte Febertage

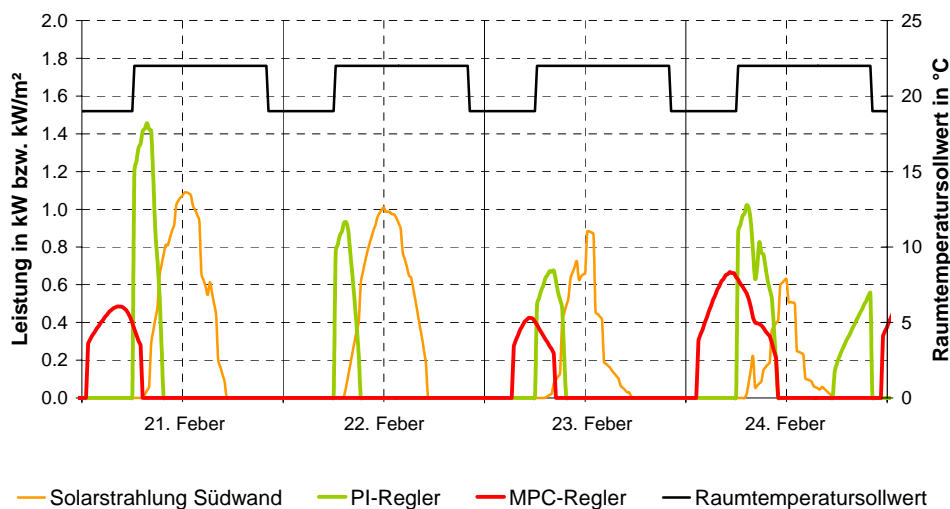


Abbildung 3: Vergleich des Verlaufs der Heizleistungen der Systeme mit MPC-Regler und PI-Regler und der solaren Einstrahlung auf die Südwall für ausgewählte Febertage

Abbildung 4 zeigt die Einsparpotentiale des MPC-Reglers im Vergleich zu einem PI-Regler und einem Zweipunktregler, aufgeschlüsselt nach den Monaten der Heizperiode.

Dabei zeigt sich, dass in den kältesten Monaten das geringste Einsparpotential vorhanden ist. Dies kann damit begründet werden, dass der PI-Regler sehr wohl in der Lage ist, die Schwankungen der Außentemperatur auszuregulieren, ohne dafür eine Voraussage der Außentemperatur zu benötigen. Da sich die Außentemperatur relativ gesehen zur Solarstrahlung nicht so stark ändert und die Außenwände ausreichend gedämmt sind, kann diese Störgröße auch vom PI-Regler relativ gut ausgeregelt werden.

Ein deutlicher Unterschied zeigt sich jedoch im März und im Oktober. In diesen Monaten ist die solare Einstrahlung in den Raum wesentlich höher als in den kältesten Monaten, wobei die Einstrahlung einen großen Einfluss auf die Raumtemperatur hat. Durch die Kenntnis der solaren Einstrahlung und die Prädiktion der Raumtemperatur ist der MPC-Regler in der Lage die Heizleistung früher zurückzunehmen und somit Energie zu sparen.

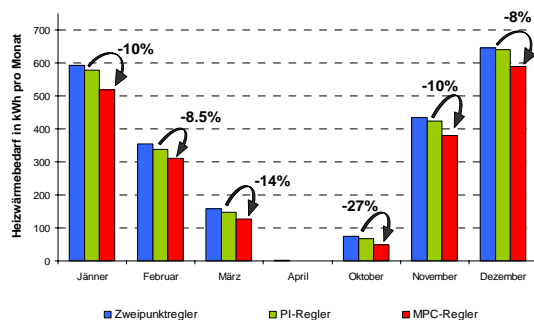


Abbildung 4: Einsparpotentiale des MPC-Reglers gegenüber einem Zweipunktregler und einem PI-Regler während der Heizperiode

Eine Jahressimulation zeigt schließlich eine **Energieersparnis (Heizwärmebedarf) von ca. 10%** durch Verwendung des MPC-Reglers gegenüber einem PI-Regler für den betrachteten Raum.

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die berechneten Ergebnisse lediglich für den betrachteten Raum und die ausgewählten Regler mit den erwähnten Reglerparametern und eine ideale Wettervorhersage gültig sind. Da lediglich die Außentemperatur und die Solareinstrahlung als Störgrößen wirkten und die Identifikation von Stell- und Störverhalten der Regelstrecke gute Ergebnisse zeigte, ist diese Energieersparnis eher als oberer Grenzwert anzusehen denn als mittlerer Wert.

Zweifellos werden mögliche Energieeinsparungen sehr stark von dem Verhalten der Regelstrecke (in diesem Fall der Raum) beeinflusst. Eine Übertragung

dieser Ergebnisse auf andere Konfigurationen, wie z.B. einem Raum mit schlechter Wärmedämmung und Radiatorenheizung ist nicht möglich.

Für den Fall einer Raumtemperaturregelung kann jedoch vermutet werden, dass ein MPC-Regelalgorithmus umso mehr Vorteile bringt, je größer die Zeitkonstanten des Stellverhaltens der Regelstrecke sind und je kleiner die Zeitkonstanten des Störverhaltens der Regelstrecke sind. Diese Zeitkonstanten sind im Wesentlichen vom Raumaufbau (schwere Bauweise ergibt große Zeitkonstanten) und dem Wärmeabgabesystem (Fußbodenheizung oder Betonkernaktivierung bedingen ebenfalls große Zeitkonstanten) abhängig.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Bei der Untersuchung der Raumtemperaturregelung konnten folgende Vor- und Nachteile eines MPC-Reglers für eine Raumtemperaturregelung festgestellt werden:

### Vorteile

Durch die zusätzlichen Informationen aus der Wettervorhersage und dem im Regler implementierten Modell der Regelstrecke sind Energieeinsparungen ohne Komforteinbußen möglich.

Der in diesem Artikel vorgestellte MPC-Regler benötigt als zusätzliche Messgröße lediglich die solare Einstrahlung. Eine Messung der Außentemperatur ist grundsätzlich vorhanden. Eine spezielle Konfiguration von Wärmeerzeugungs- oder Wärmeabgabesystem ist nicht nötig. Bei der heutigen Rechengeschwindigkeit von Mikroprozessoren bzw. Leitetchnikkreisläuferechnern stellen auch die Leistungsanforderungen an die Hardware kein besonderes Problem dar.

Zumindest in der betrachteten Konfiguration ergaben sich keine Stabilitätsprobleme des geschlossenen Regelkreises mit MPC-Regler.

### Nachteile

Ein (möglichst gutes) Modell der Regelstrecke ist erforderlich. Die Modellbildung kann einen sehr hohen Arbeitsaufwand verursachen. Zusätzlich ist die Performance des MPC-Regelkreises wesentlich von der Güte des Modells abhängig.

Eine Wettervorhersage ist nötig. Der MPC-Regler muss daher stets „online“ sein, um Wetterdaten abrufen zu können, falls eine Wettervorhersage durch einen Wetterdienst verwendet wird.

Die Parametrierung des MPC-Reglers erfolgt grundsätzlich anders als die Parametrierung der bekannten linearen (PID) Regler. Ein wesentliches Umdenken des Regelungstechnikers wird damit erforderlich. Zusätzlich gestaltet sich die Theorie

relativ komplex im Vergleich zur klassischen Regelungstechnik.

### Weitere Erkenntnisse

Die Kombination von TRNSYS und MATLAB stellt eine sehr brauchbare Basis zur Untersuchung von Regelungen in der Gebäudetechnik dar.

In TRNSYS kann mit dem Type56 (multizone building) das dynamische Verhalten eines Gebäudes relativ komfortabel simuliert werden, da lediglich der physikalische Aufbau des Gebäudes eingegeben werden muss und die dynamischen Zusammenhänge (z.B. Übertragungsfunktionen der Wände oder Strahlungsmodelle) vom Programm zur Verfügung gestellt werden. Eine Programmierung von Regelalgorithmen erscheint jedoch als schwierig, da hierfür eigene Types entworfen werden müssten und zusätzlich leistungsfähige Matrizenoperationen, wie sie für MPC benötigt werden, nicht unmittelbar vorhanden sind.

MATLAB wiederum stellt leistungsfähige Toolboxes für den Entwurf und die Parametrierung von Reglern zur Verfügung. Die Ausrichtung des Programmpakets auf Vektor- und Matrizenoperationen kommt MPC-Algorithmen besonders entgegen.

Die Schnittstelle zu MATLAB in TRNSYS (ausgeführt durch den Type155) ist relativ einfach in Form eines m-Scripts gestaltet und bereitet bei der Programmierung keine besonderen Schwierigkeiten.

So können durch die Kombination der beiden Programmpakete die durchaus unterschiedlichen Welten von Gebäudesimulation und Regelungstechnik einigermaßen unkompliziert miteinander kombiniert werden. Einen Nachteil stellt die Ausführungsgeschwindigkeit der Simulation dar, da durch den Aufruf von MATLAB in jedem Zeitschritt die Simulation stark eingebremst wird.

### ZUSAMMENFASSUNG

Für die Simulation einer prädiktiven Raumtemperaturregelung wurden die Simulationsplattformen TRNSYS und MATLAB über eine in TRNSYS verfügbare MATLAB-Schnittstelle (Type155) gekoppelt. Die gebäudetechnischen Berechnungen sowie die Bereitstellung der Wetterdaten wurden in TRNSYS durchgeführt. An MATLAB wurden alle für den Regelalgorithmus relevanten Daten übergeben und dann in jedem Zeitschritt die Stellgröße berechnet, welche wieder an TRNSYS übergeben wurde.

Die simulationstechnische Untersuchung einer Raumtemperaturregelung mit einem prädiktiven Regler (MPC-Regler) lieferte für den betrachteten Raum ein Energieeinsparungspotential von ca. 10% für eine Heizperiode gegenüber einem herkömm-

lichen PI-Regler. Für bestimmte Wetterkonstellationen mit hoher solarer Einstrahlung war über einen begrenzten Zeitraum eine Energieeinsparung von ca. 30% zu beobachten.

### LITERATUR

- Beigelböck, B (2009): Abschätzung des Energieeinsparungspotentials durch Simulation einer Raumtemperaturregelung mit Hilfe von modellbasierten prädiktiven Regelalgorithmen unter Verwendung einer idealen Wettervorhersage, Diplomarbeit, FHS-Burgenland, Bibliothek Pinkafeld.
- Bemporad, A.; Morari, M. und Ricker, N.L. (1995): Model Predictive Control Toolbox™ 3 – User Guide, Revision March 2009, The MathWorks Inc., Natick (USA)
- Bollin, E. (2008): Predictive Operation of Sustainable Buildings, Hochschule Offenburg, Boston Symposium, 08.12.2008, Boston
- Dittmar, R. und Pfeiffer, B.-M. (2004): Modellbasierte prädiktive Regelung, Oldenburg Verlag, München Wien
- Gwerder, M. und Tödtli, J. (2007): The use of weather forecasts in building automation and control systems (BACS): How to use them? What is the benefit?, 9th REHVA World Congress for Building Technologies – CLIMA 2007, 12.-14. Juni 2007, Helsinki
- OptiControl-Projekt (2010): Webseite des Projekts Opticontrol, <http://www.opticontrol.ethz.ch/>, abgerufen am 2.6.2010 um 08:15 Uhr
- Schmid, W. (7/2008): Mit Wetterprognose Energie sparen, Zeitschrift: TGA-Fachplaner, Ausgabe 7/2008, S. 30-36, München
- TRNSYS (2007): Dokumentation Volume 6 – Multizone Building modelling with Type56 and TRNBuild, Transsolar Energietechnik GmbH, Stuttgart
- Wang, L. (2009): Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, Springer-Verlag