

Der energetische „Performance Bound“ – eine rechnerische Messlatte für die Gebäuderegulung

D. Gyalistras
Systemökologie, ETH Zürich

6. Planerseminar: Simulationen – Neue Anwendungen
23. März 2010
Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw

Projekt-Team

D. Gyalistras, A. Fischlin ¹

M. Morari, F. Oldewurtel, C.N. Jones, A. Parisio ²

T. Frank, S. Carl, V. Dorer, B. Lehmann, K. Wirth ³

P. Steiner, F. Schubiger, V. Stauch ⁴

D. Habermacher, C. Gähler, M. Gwerder, B. Illi, J. Tödtli ⁵

A. Seerig, C. Sagerschnig ⁶

¹ Terrestrial Systems Ecology Group, ETH Zurich

² Automatic Control Laboratory, ETH Zurich

³ Building Technologies Laboratory, Empa Dübendorf

⁴ Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss), Zurich

⁵ Building Technologies Division, Siemens Switzerland Ltd, Zug

⁶ Building Climate Control, Building Physics & Simulations, Gruner AG, Basel

<http://www.opticontrol.ethz.ch/>

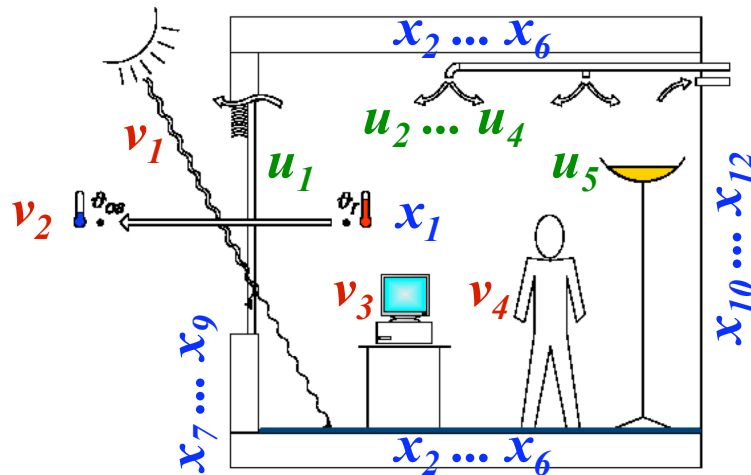
Übersicht

- Einleitung
- Berechnung des „Performance Bound“
- Anwendungsbeispiele
- Schlussbemerkungen

Einleitung – Gebäuderegulung

- Optimierung hat in der Gebäudesimulation eine lange Tradition
- Bedeutung der Gebäudeautomation für Energieeffizienz wird zunehmend anerkannt (SIA 386.110/EN 15232)
- Optimale Regelung?

Beispiel: Regelungsproblem für 1 Gebäudezone



x_i Systemzustände

v_i Störgrößen

u_i Steuergrößen

... so zu wählen, dass Temperatur, Beleuchtungsstärke und CO_2 -Gehalt unter minimalen Kosten innerhalb des Komfortbereichs bleiben

Einleitung – Optimierungsproblem

Mathematisches Optimierungsproblem:

Minimiere:

$$J_N = \sum_{j=1}^N \vec{c}_{(j)}^T \vec{u}_{(j)}$$

$\vec{c}_{(j)}$ = *Kostenvektor*

$\vec{u}_{(j)}$ = *Steuergrößen*

Unter den Bed.:

$$\vec{x}_{(k=0)} = \vec{x}_0$$

k = *Zeitschritt*

$$\vec{x}_{(k+1)} = f(\vec{x}_{(k)}, \vec{u}_{(k)}, \vec{v}_{(k)})$$

$\vec{x}_{(k)}$ = *Systemzustände*

$$\vec{u}_{\min(k)} \leq \vec{u}_{(k)} \leq \vec{u}_{\max(k)}$$

$\vec{v}_{(k)}$ = *Störgrößen*

$$\vec{x}_{\min(k)} \leq \vec{x}_{(k)} \leq \vec{x}_{\max(k)}$$

- Auf Standardproblem zurückführen (z.B. „Lineares Programm“)
- “Solver”-Software nutzen (z.B. clp, cplex, Ip_solve, etc.)

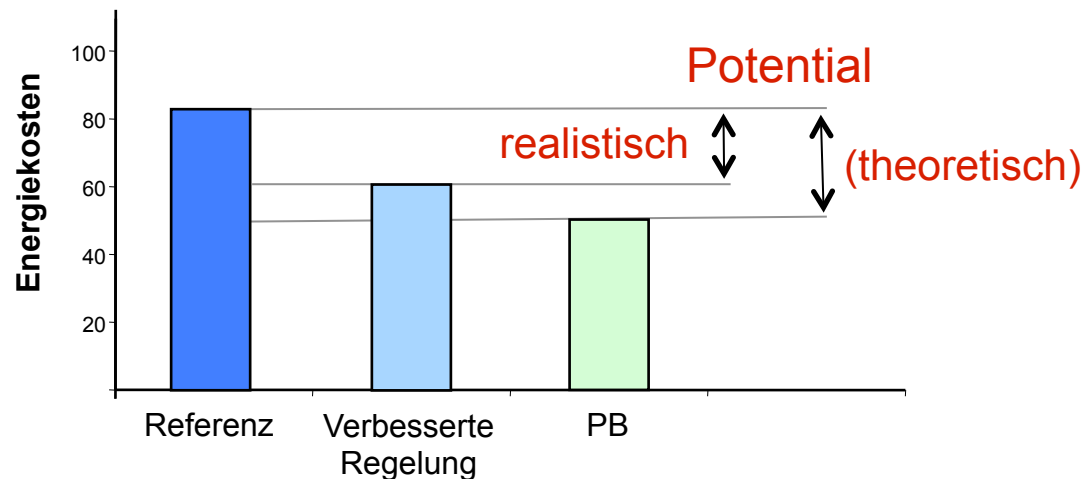
Einleitung – „Performance Bound“ (PB)

„Performance Bound“ (PB)

- = Grenze der Leistungsfähigkeit (einer Regelung)
- = **der theoretisch minimale Energieverbrauch** für eine gegebene Anwendung
(Gebäude; Haustechniksystem; Kostenfunktion; Verlauf von Wetter, Belegung sowie internen Lasten; Betriebsarten; Komfortanforderungen)
- = die energieoptimale Lösung für die Steuergrößen $\vec{u}_j, j = 1 \dots N$ **wenn „alles“ perfekt bekannt ist.**

Einleitung – Anwendungen PB?

- Frühe Untersuchung von Planungsvarianten ohne dass die Regelung feststehen muss, insbesondere für verschiedene
 - Haustechniksysteme
 - Komfortvorgaben
 - Kostenfunktionen
- Verbesserungspotential von Regelstrategien analysieren



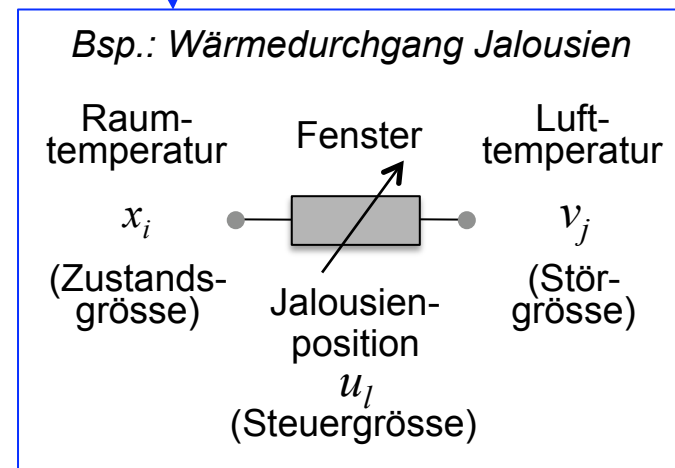
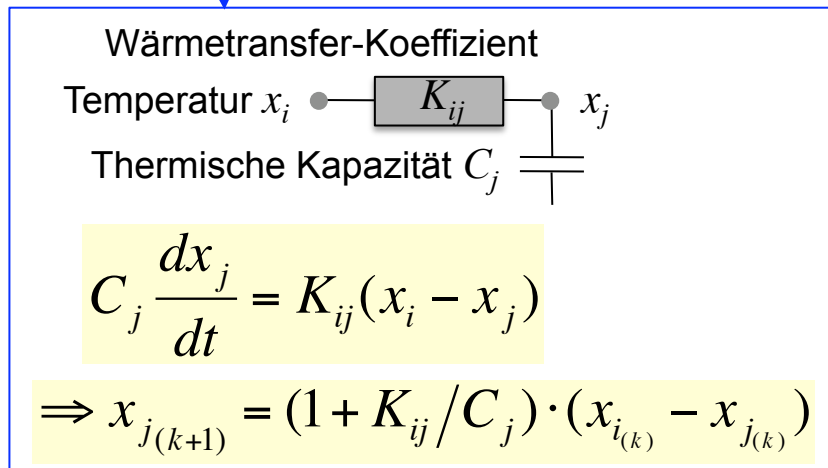
Modellierung von Gebäude+Haustechnik

- Mathematisches Modell für die Systemdynamik

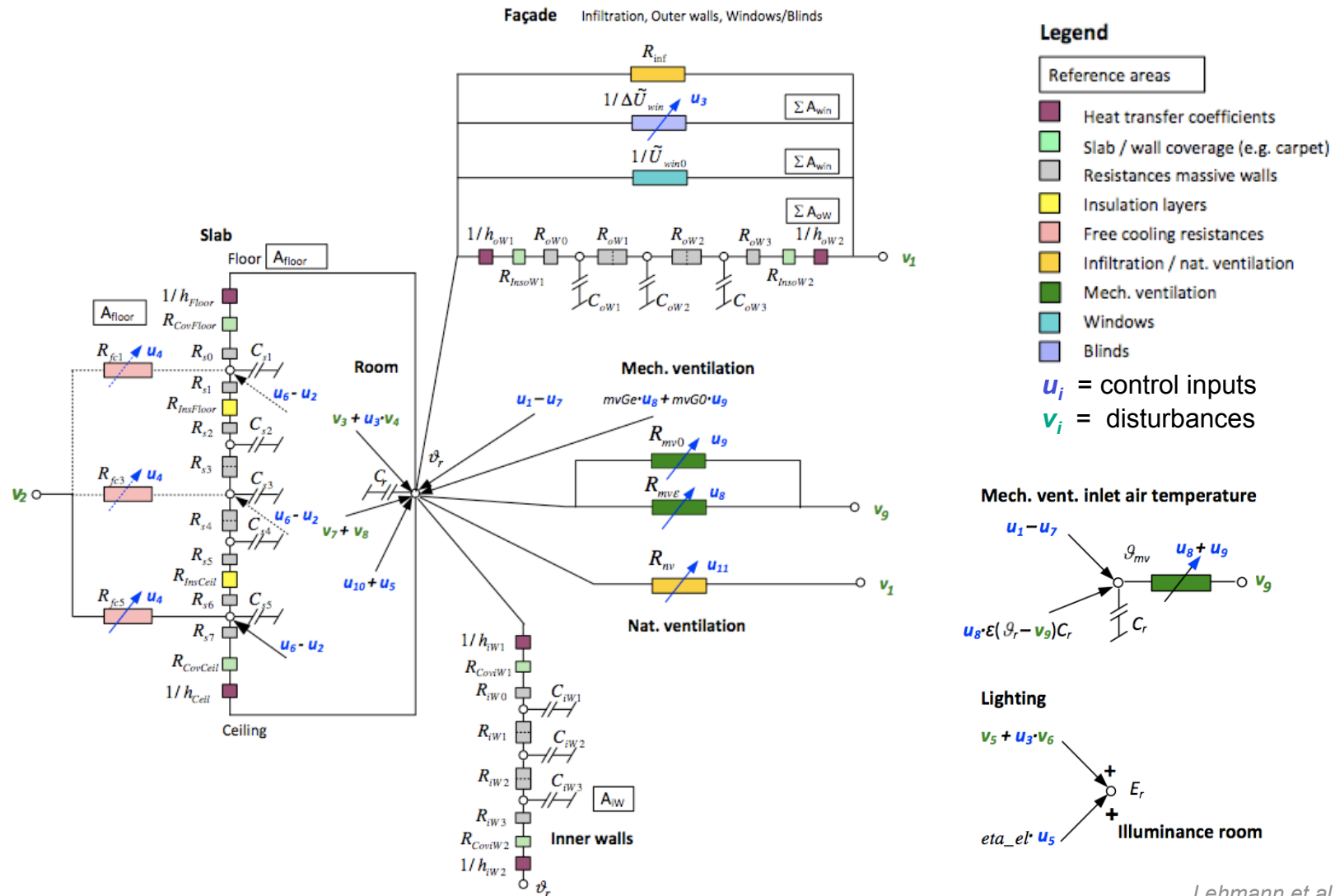
$$\vec{x}_{(k+1)} = f(\vec{x}_{(k)}, \vec{u}_{(k)}, \vec{v}_{(k)}) \quad \dots \text{ in allg. Form nicht „optimierbar“}$$

- Vereinfachung: Bilineares Modell

$$\vec{x}_{(k+1)} = \boxed{A\vec{x}_{(k)}} + B_u \vec{u}_{(k)} + B_v \vec{v}_{(k)} + \sum_{i=1}^{n_u} \boxed{(B_{vu} \vec{v}_{(k)} + B_{xu} \vec{x}_{(k)})} \vec{u}_{i(k)}$$



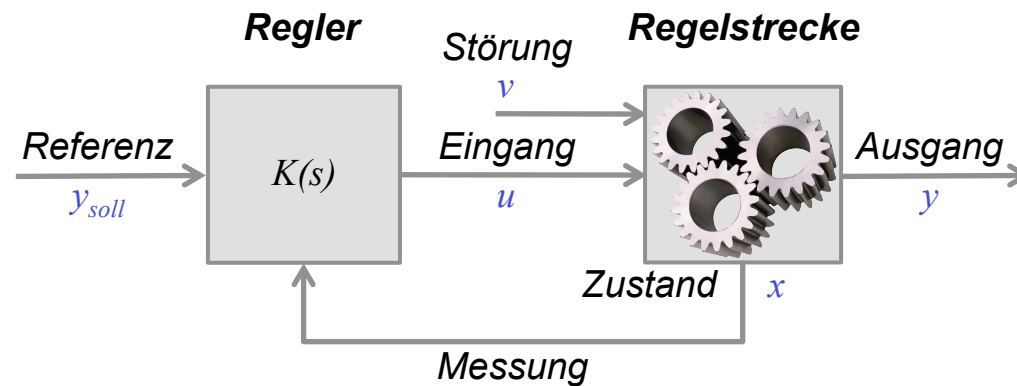
Vollständiges Modell für eine Gebäudezone



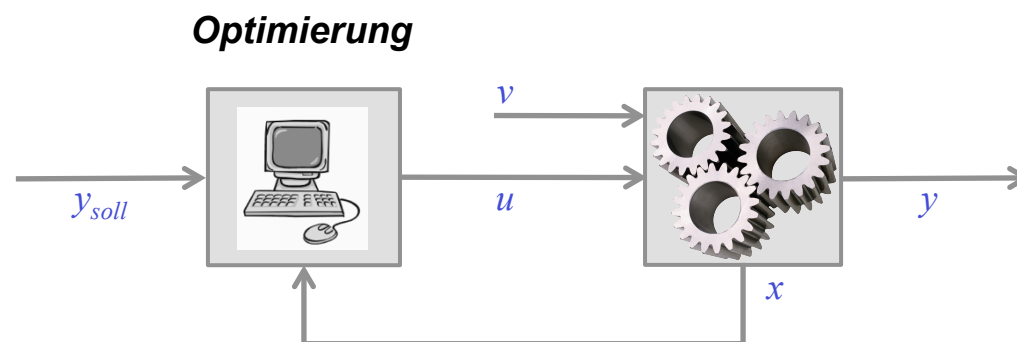
Lehmann et al. (2009)

„Model Predictive Control“ (MPC)

Klassische Regelung



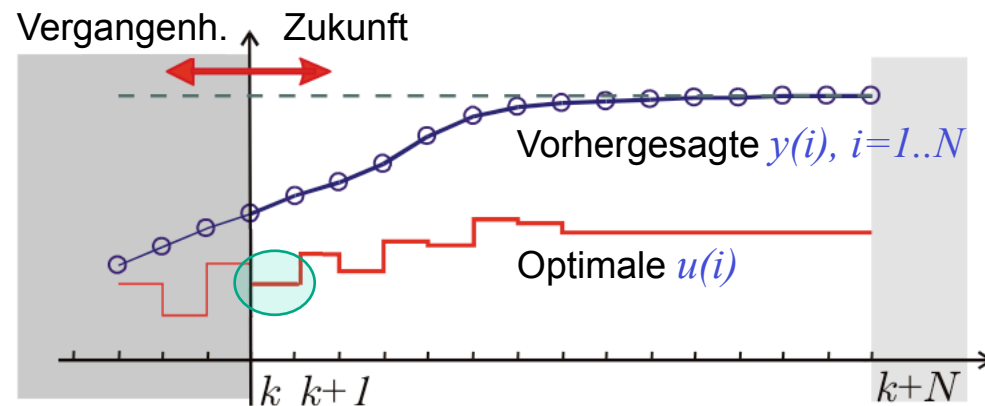
Model Predictive Control



MPC: „Receding Horizon“-Konzept

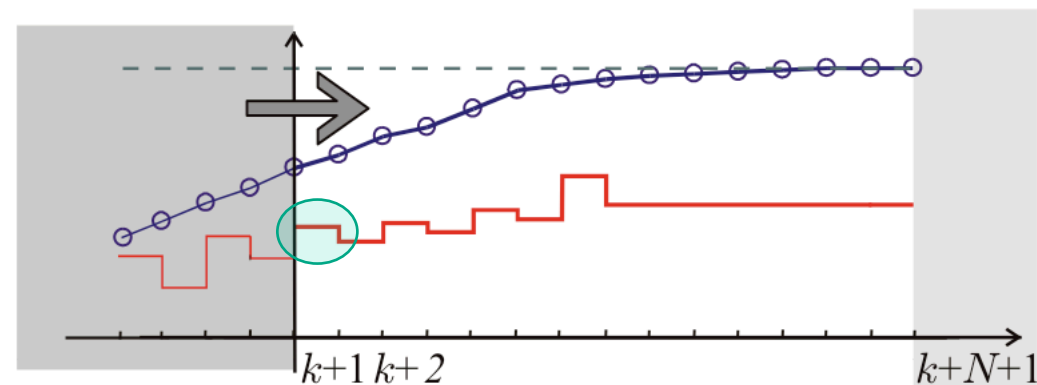
1. Definiere das Optimierungsproblem mit endlichem Vorhersage-Horizont

2. Löse das Problem zum Zeitpunkt k mit Messungen $x(k)$



3. Verwende nur die erste Steuergrösse $u(1)$

4. Wiederhole die Optimierung für den Zeitpunkt $k+1$



PB-Berechnung mittels MPC

Voraussetzungen:

- a. Modell im MPC-Regler trifft perfekt zu
- b. Initialzustand $x_{(0)}$ ist perfekt bekannt
- c. Vorhersage-Horizont ist genügend lang
- d. Zukünftige Störungen (Wetter, interne Lasten) sind perfekt bekannt

Beispiel – Definition Gebäude

Gebäudestandard	CH-Mittelwert (CH-M) oder Passivhaus (PH)
Fassadenausrichtung	N, S
Konstruktionstyp	Schwer
Anteil Fensterfläche	80 %
Interne Lasten	Hoch
Wetterdaten	Zürich (“Design Reference Year”)
Interne Lasten	SIA 2024 (Standardnutzung Bürogebäude)
Temperatur-Komfort	Breiter Komfortbereich, aussentemper.-abh. mit/ohne „Set-back“
Kostenfunktion	Nicht-erneuerbare Primärenergie (Erdegekoppelte Wärmepumpe, mechanische Kühlung)
Zeitschritt	1 Stunde
Vorhersage-Horizont	6 Tage

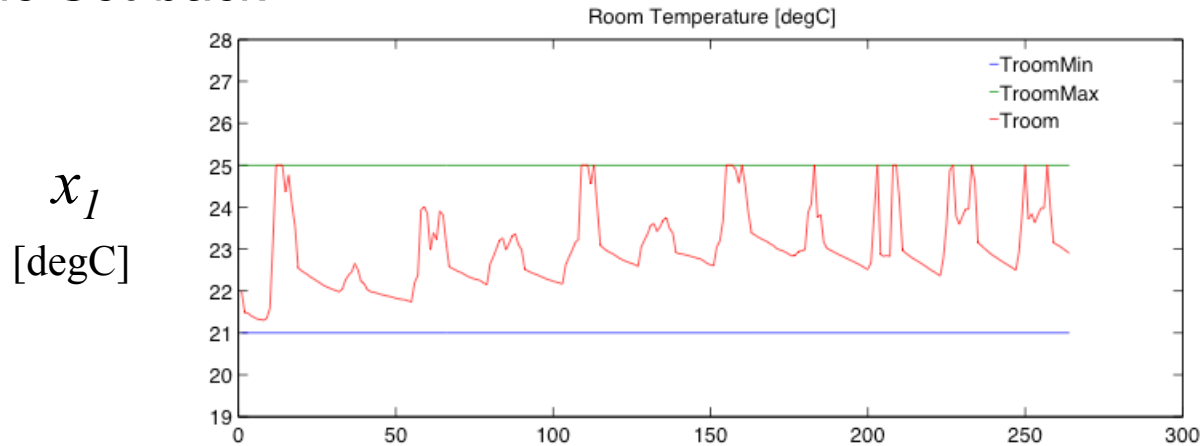
Beispiel – Systemvarianten

Haustechnik-System

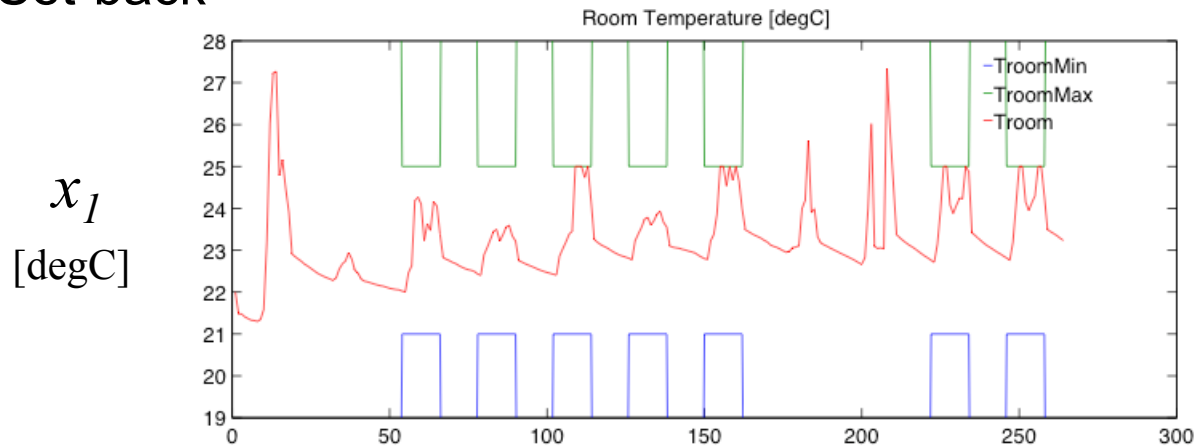
<i>Automatisierte Subsysteme</i>	A	B	C
Jalousien	X	X	X
Elektrische Beleuchtung	X	X	X
Kühldecke (Kapillar-Rohrtechnik)	X	X	X
Freie Kühlung (nasser Kühlturm)	X	X	X
Heizkörper	X	X	X
Mech. Ventilation (Volumenstrom, Heizen, Kühlen)	–	X	X
Mech. Ventilation (Energierückgewinnung)	–	X	X
CO ₂ - geregelte Ventilation	–	–	X

Beispiel – Thermische Komfort-Vorgaben

a. „Ohne Set-back“

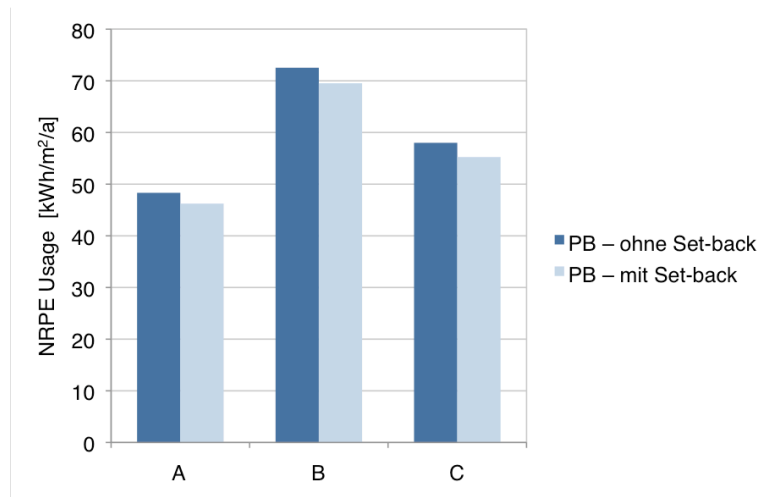


b. „Mit Set-back“

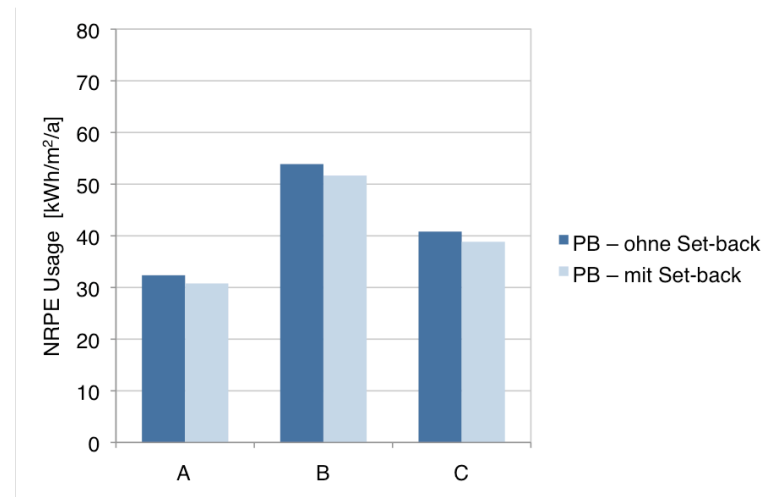


Totaler Jahres-Energieverbrauch

Zürich, CH-M, Fassade N

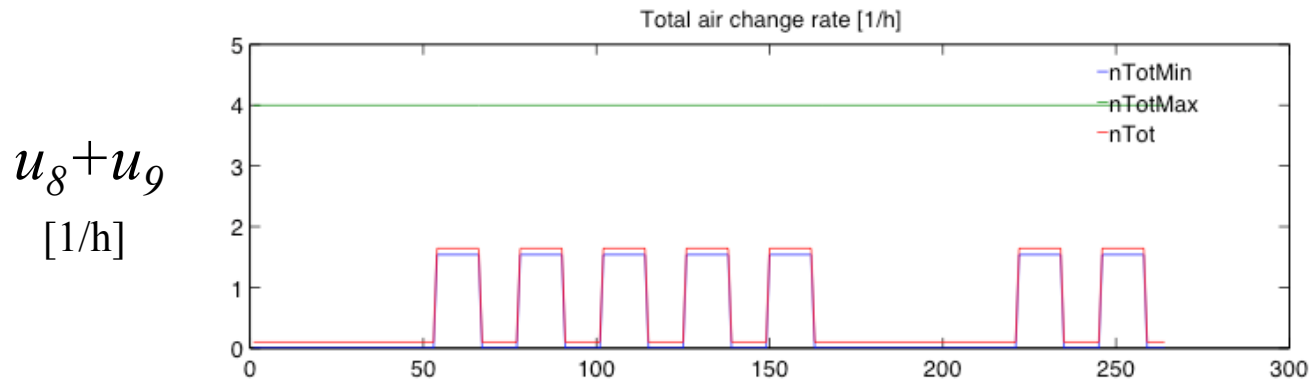


Zürich, CH-M, Fassade S

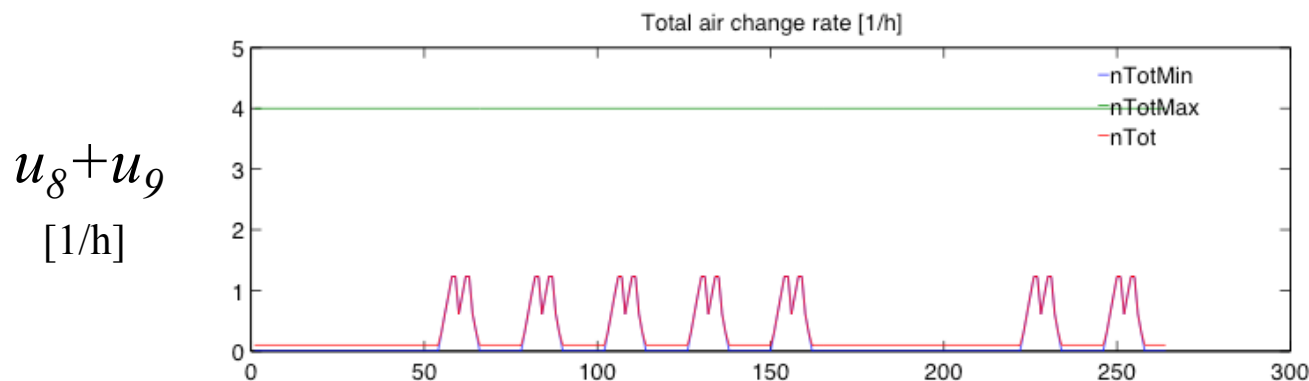


Beispiel – Begrenzung Luftwechselrate

a. „Ohne CO₂-Regelung“ (System B)

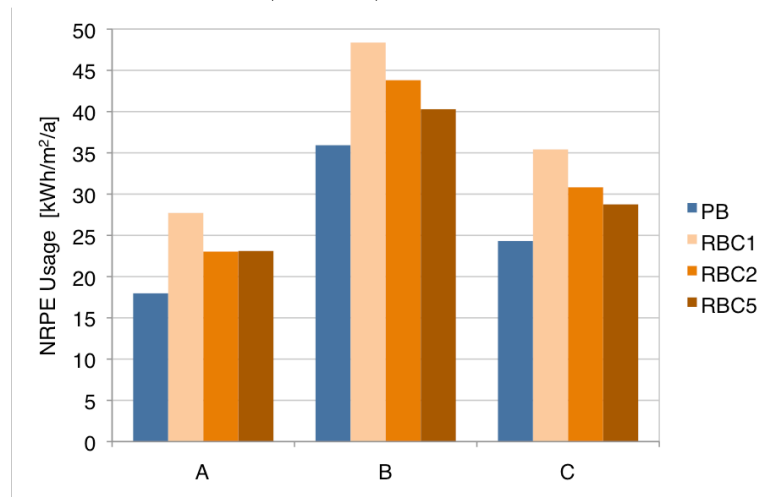


b. „Mit CO₂-Regelung“ (System C)

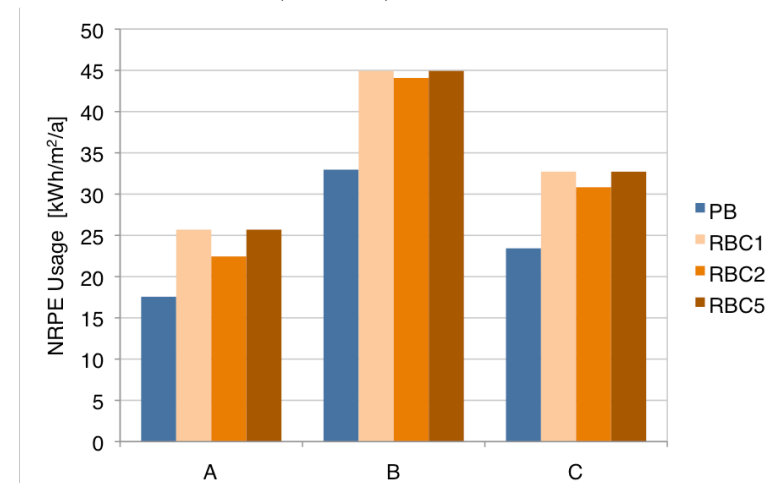


Totaler Jahres-Energieverbrauch

Zürich, PH, Fassade N



Zürich, PH, Fassade S

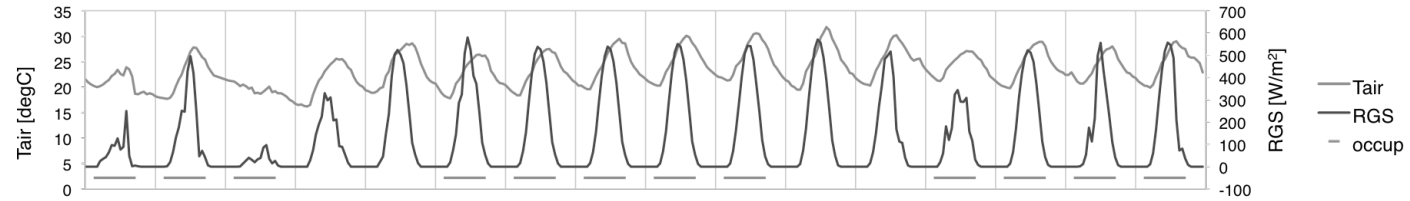


PB = “Performance Bound” (Rechenzeit: ca. 10 min/Jahr)

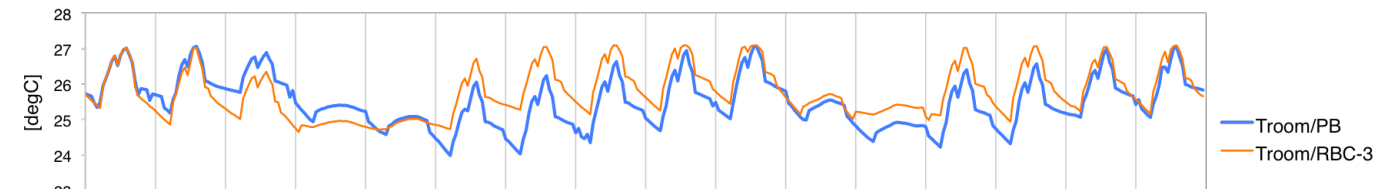
RBC1, RBC2, RBC5: Regelbasierte Kontrollstrategien

PB vs. regelbasierte Strategie

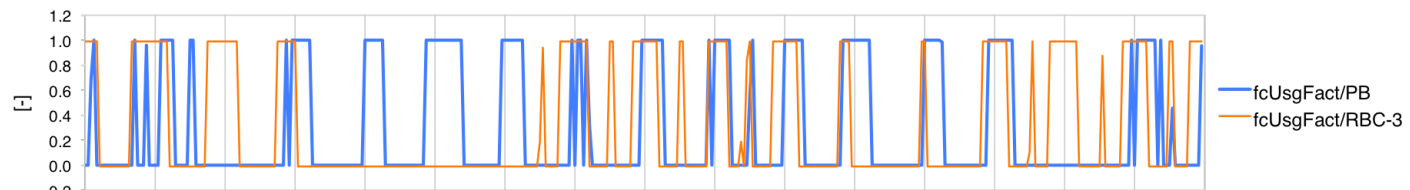
Wetter



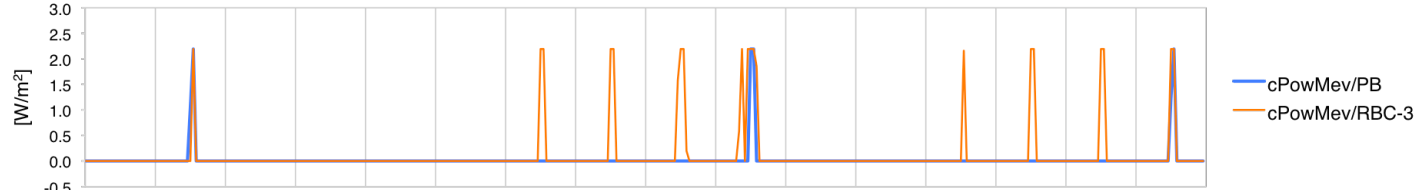
Raum-Temperatur



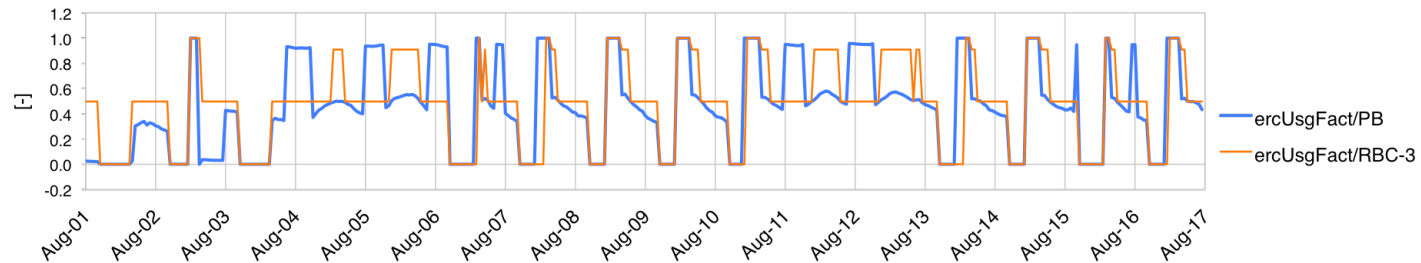
Faktor für freie Kühlung



Kühlleistung mech. Ventilation



Faktor für Energierückgewinnung



Schlussbemerkungen

- Performance Bound nützlich
 - in der früher Planungsphase (?)
 - für den Reglerentwurf
- Anwendung auf relativ “einfache” Fälle beschränkt
- Relativ hoher Modellierungsaufwand
- Modellparameter müssen vorliegen (Planungsunterlagen)
- Randbedingungen müssen präzise definiert werden (Formalisierung des Regelproblems)
- Generische Prototyp-Software mit vielen Standard-Vorgaben liegt vor
- Effiziente und sehr flexible Auswertungen möglich