

# ***Prädiktive Regelung von Gebäuden: Methoden, Werkzeuge und Fallstudie Integrierte Raumautomation***

D. Gyalistras

Gruppe für Terrestrische Systemökologie  
& Institut für Automatik, ETH Zürich

Hochschule Luzern, Technik & Architektur  
26. Oktober 2009

# Überblick

---

- Das *OptiControl*-Projekt
- Prädiktive Regelung von Gebäuden
- Integrierte Raumautomation
- Modellierung
- Simulation
- Experimente & Resultate
- Schlussfolgerungen

# OptiControl-Projekt: Kurzbeschreibung

---

## Ziele:

Entwicklung von Methoden, um mithilfe von Wettervorhersagen und Belegungs-Informationen

- die *Energieeffizienz* und den *Komfort* von Gebäuden zu verbessern;
- die *elektrische Spitzenlast* von Gebäuden zu reduzieren.

## Erwartete Resultate:

- Methoden
- Software/Werkzeuge
- Kosten-Nutzen Analysen
- Anwendung auf Demonstrationsobjekt

**Laufzeit:** Februar 2007 – Juli 2010

**Sponsoren:** swisselectric research, CCEM-CH, Siemens BT

# OptiControl-Projekt: Teilnehmer

---

D. Gyalistras<sup>1+2</sup>, A. Fischlin <sup>1</sup>

M. Morari, C.N. Jones, F. Oldewurtel, A. Parisio <sup>2</sup>

T. Frank, S. Carl, V. Dorer, B. Lehmann, K. Wirth<sup>3</sup>

P. Steiner, F. Schubiger, V. Stauch <sup>4</sup>

D. Habermacher, C. Gähler, M. Gwerder, B. Illi (J. Tödtli) <sup>5</sup>

(A. Seerig, C. Sagerschnig <sup>6</sup>)

<sup>1</sup> Gruppe für Terrestrische Systemökologie, ETH Zürich

<sup>2</sup> Institut für Automatik, ETH Zürich

<sup>3</sup> Abteilung Bautechnologien, Empa, Dübendorf

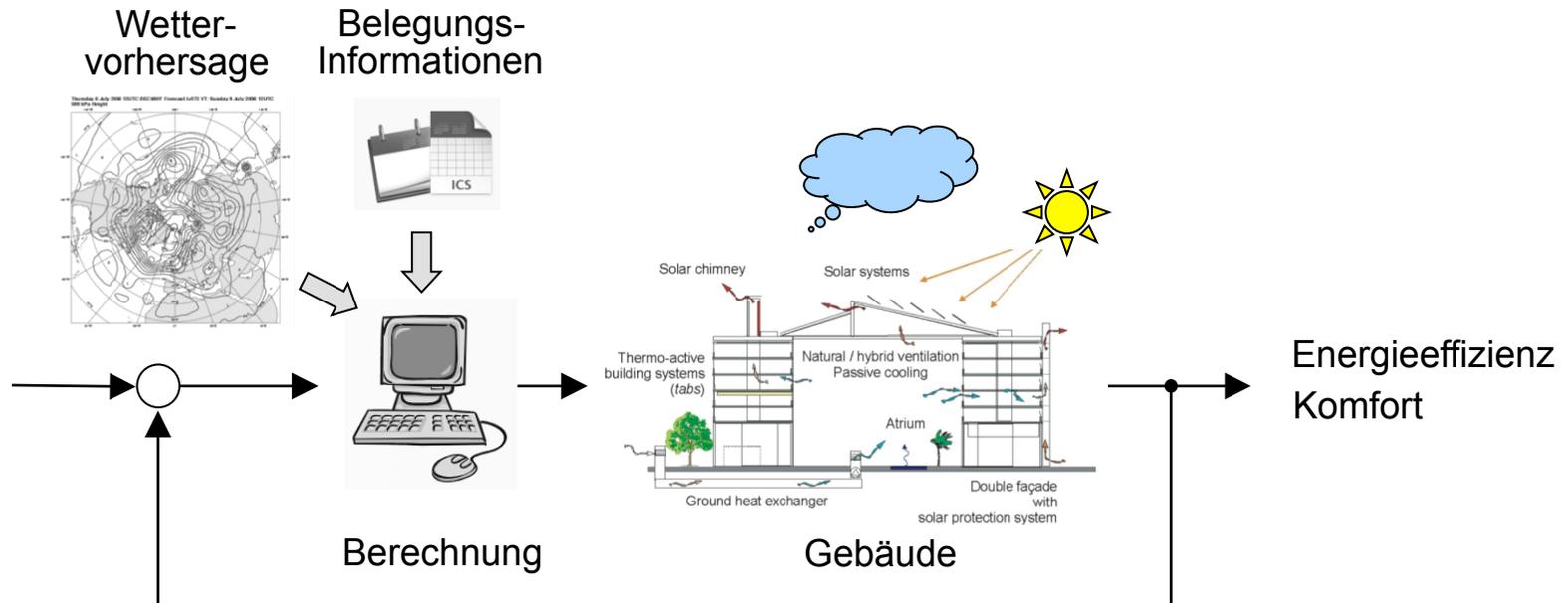
<sup>4</sup> Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich

<sup>5</sup> Building Technologies Division, Siemens Schweiz AG, Zug

<sup>6</sup> Gruner AG, Bauphysik und Simulationen Basel

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

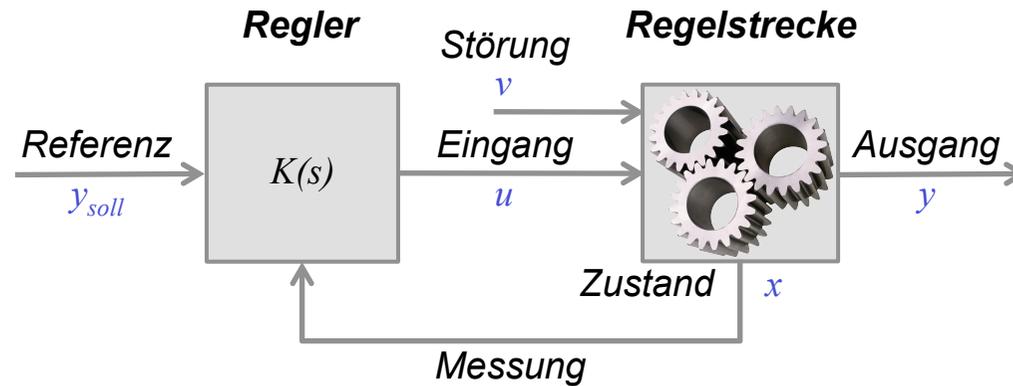
# Prädiktive Regelung: Motivation



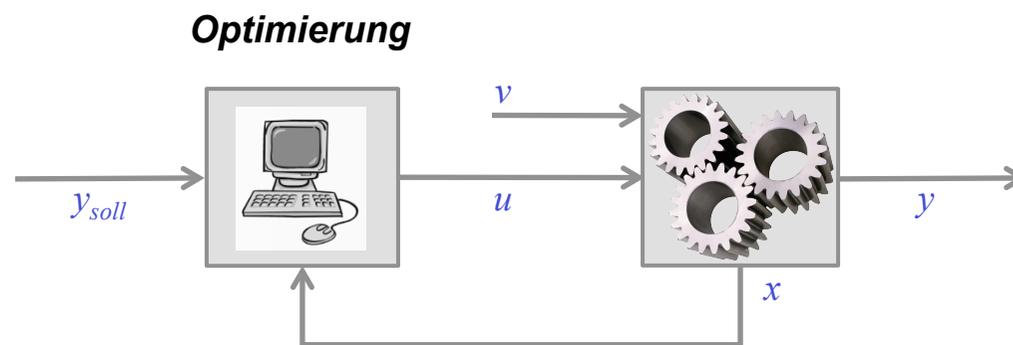
- Normen:** Einhalten von Komfortvorgaben “mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit”
- Ziel:** Minimierung des Energieaufwands (oder der monetären Kosten)
- Idee:** Erneuerbare Energiequellen und Gebäudedynamiken sind langsam und unregelmässig – nutze Vorhersagen der “Störungen” zur besseren Planung
- Methode:** *Prädiktive Regelbasierte Regelung* oder *Model Predictive Control* unter Verwendung von Wetter- und Belegungsvorhersagen

# „Model Predictive Control“ (MPC)

## Klassische Regelung



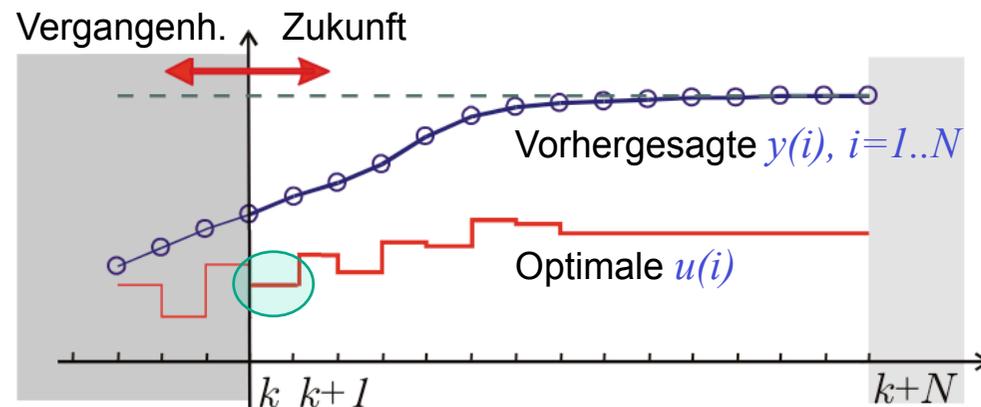
## Model Predictive Control



# MPC: „Receding Horizon“-Konzept

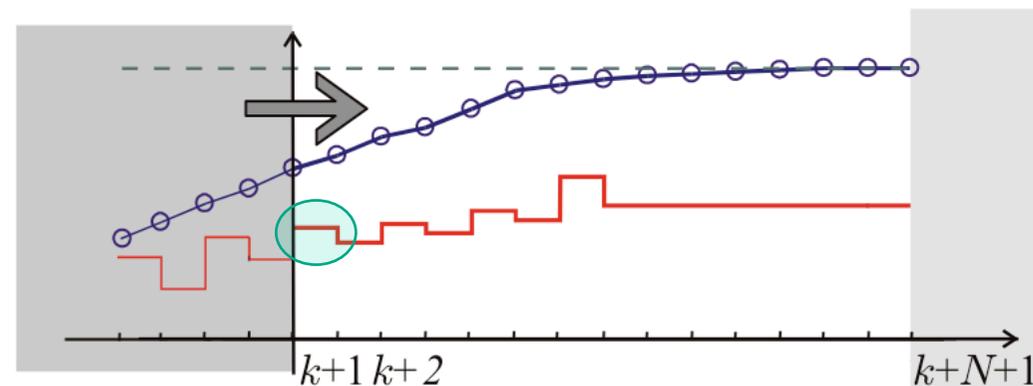
1. Definiere das Optimierungsproblem mit endlichem Prädiktions-Horizont

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  $k+1$



# MPC: Optimierungsproblem

1) Formuliere ein zeitdiskretes Modell der Regelstrecke, z.B.

$$\begin{aligned}x_{(k+1)} &= Ax_{(k)} + B_u u_{(k)} + B_v v_{(k)} \\ y_{(k)} &= Cx_{(k)} + D_u u_{(k)} + D_v v_{(k)}\end{aligned}$$

2) Formuliere die geltenden Einschränkungen, z.B.

$$\begin{aligned}u &\in [0 \dots u_{\max}] \\ y &\in [y_{\min} \dots y_{\max}]\end{aligned}$$

3) Definiere den Anfangszustand

$$x_{(k)} = \dots$$

4) Definiere die Störungen

$$v_{(k)}, v_{(k+1)} \dots v_{(k+N)} = \dots$$

5) Definiere die Zielfunktion, z.B.

$$J_N = \sum_{i=1}^N x_{(i)}^T Q x_{(i)} + R u_{(i)}$$

6) Ermittle die Sequenz  $u_{(i)}$ , welche  $J_N$  unter Beachtung von 1) – 5) minimiert, z.B. mittels „Quadratischer Programmierung“ (QP).

# MPC: Umgang mit Vorhersagen

$$\begin{aligned}x_{(k+1)} &= Ax_{(k)} + B_u u_{(k)} + B_v v_{(k)} \\y_{(k)} &= Cx_{(k)} + D_u u_{(k)} + D_v v_{(k)}\end{aligned}$$

Es müssen Vorhersagen der Störungen vorliegen

Ansatz 1: Die vorhandenen Vorhersagen werden als „bare Münze“ genommen. Die Optimierung wird durchgeführt, und die erhaltene Steuergrösse  $u(1)$  einfach angewendet.

→ “Certainty Equivalent MPC” (CE-MPC)

Ansatz 2: Die Vorhersagen gehen zusammen mit einem Mass für deren Unsicherheit in die Optimierung ein.

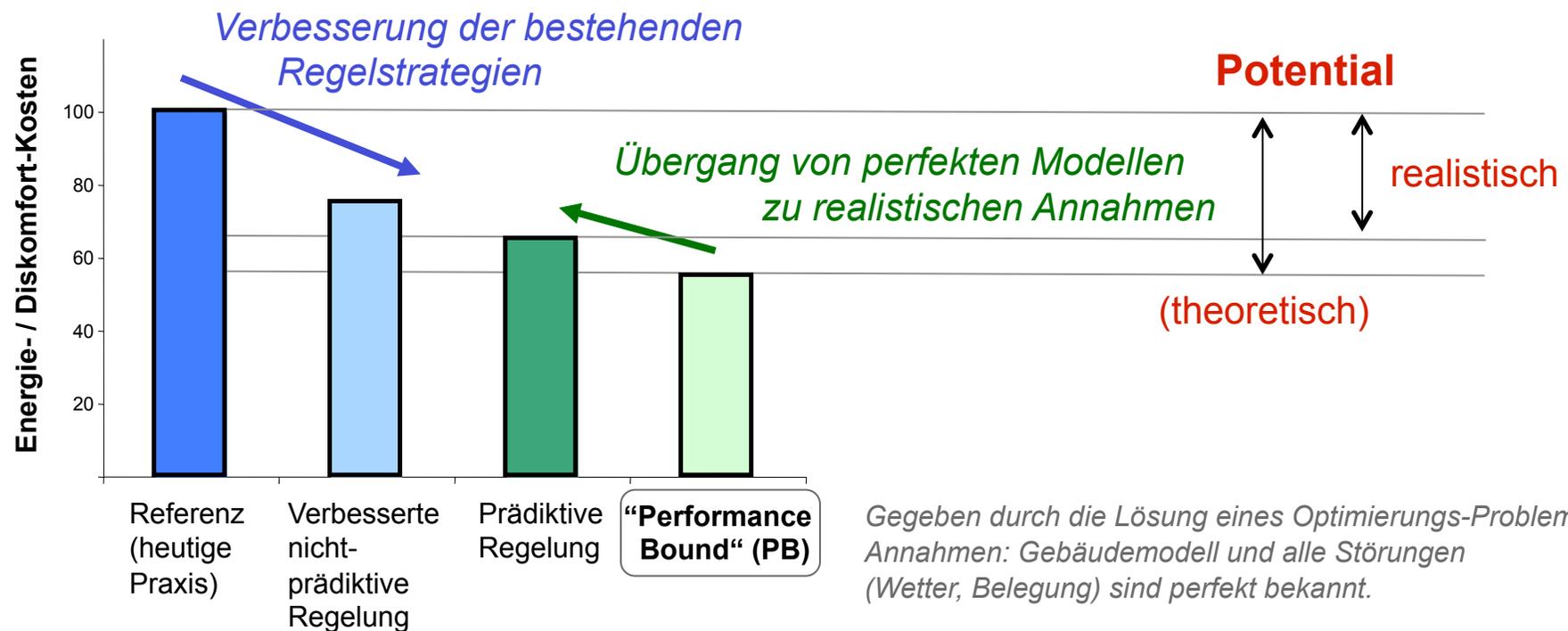
$$\text{Z.B. } v_{(k)} \sim \mu_{(k)} + N(0, \sigma_{(k)})$$

→ “Stochastic MPC” (S-MPC)

# Prädiktive Regelung: Beurteilung

Informationsstufen:

1. “perfekte Welt – wir wissen alles”
2. “reelle Welt, ohne Wettervorhersagen”
3. “reelle Welt, mit Wettervorhersagen”



# Integrierte Raumautomation (IRA)

Integrierte Regelung  
der

- Heizung
- Kühlung
- Lüftung
- Elektr. Beleuchtung
- Storen



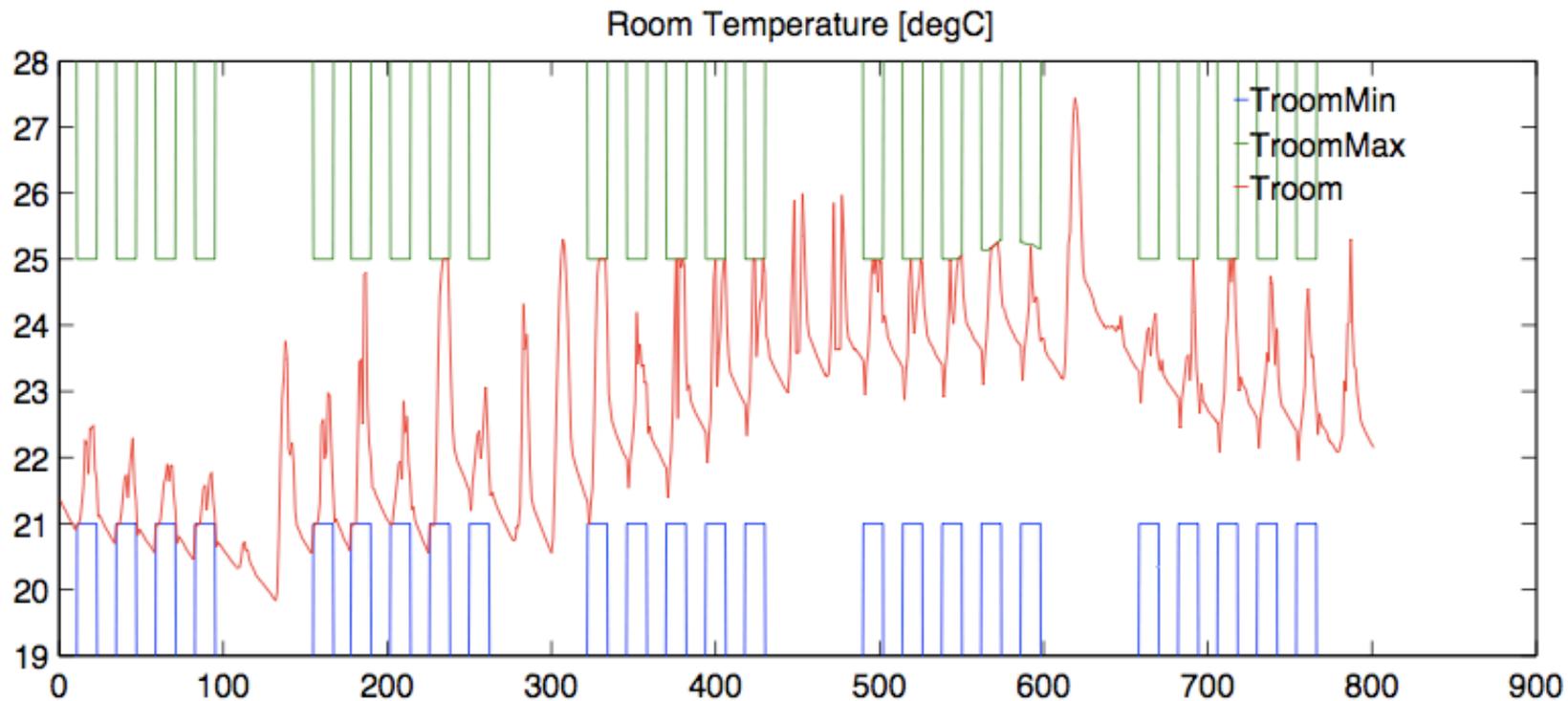
eines Einzelraums oder  
einer Gebäudezone

# IRA: Betrachtete Haustechniksysteme

<i>Automatisierte Subsysteme</i>	<i>Haustechniksystem</i>				
	S1	S2	S3	S4	S5
Storen	X	X	X	X	X
Elektrische Beleuchtung	X	X	X	X	X
Mech. Lüftung: Vol.strom, Heizen, Kühlen	–	X	X	X	X
Mech. Lüftung: Energierückgewinnung	–	X	X	X	X
Natürliche Lüftung (nur Nachts)	–	–	–	X	–
Kühldecke (Kapillarrohr-System)	X	X	–	–	–
Freie Kühlung mit nassem Kühlturm	X	X	–	–	X
Radiatorheizung	X	X	–	–	–
Bodenheizung	–	–	–	X	–
Tags zum Heizen und Kühlen	–	–	–	–	X

# Regelungsaufgabe

Minimiere den Energieaufwand (oder die monetären Kosten) unter gleichzeitiger Einhaltung der vorgegebenen Komfortbereiche für die Raumtemperatur, die Leuchtdichte, und die CO<sub>2</sub>-Konzentration.



# Modellierung: Welches Gebäudemodell?

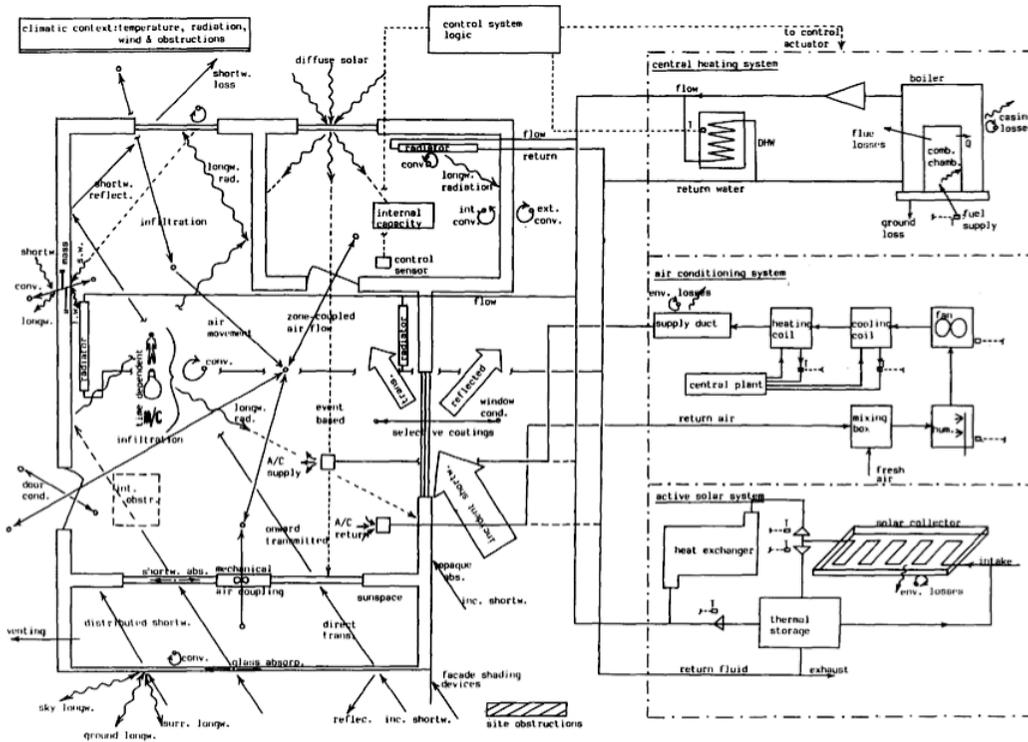
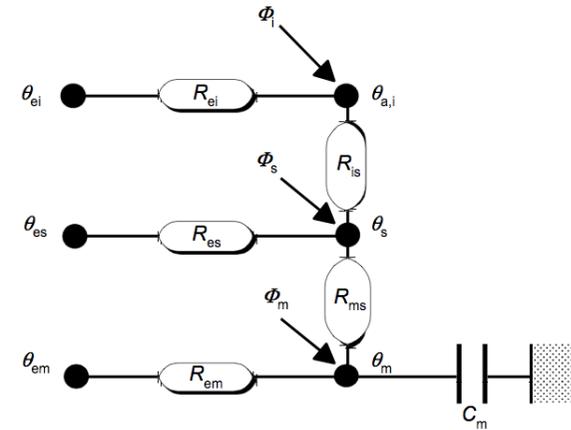
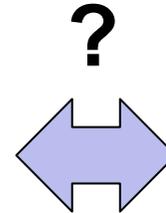


Fig. 1. Building energy flowpaths.



# Gebäudemodellierung: “RC” Ansatz

## Wärmetransfer-Rate

$$\frac{dQ}{dt} = U \cdot A \cdot (\vartheta_e - \vartheta_i)$$
$$\Rightarrow \underbrace{\frac{dQ}{d\vartheta_i}}_{C_i} \cdot \underbrace{\frac{d\vartheta_i}{dt}}_{K_{ie}} = U \cdot A \cdot (\vartheta_e - \vartheta_i)$$

## Thermische Kapazität C

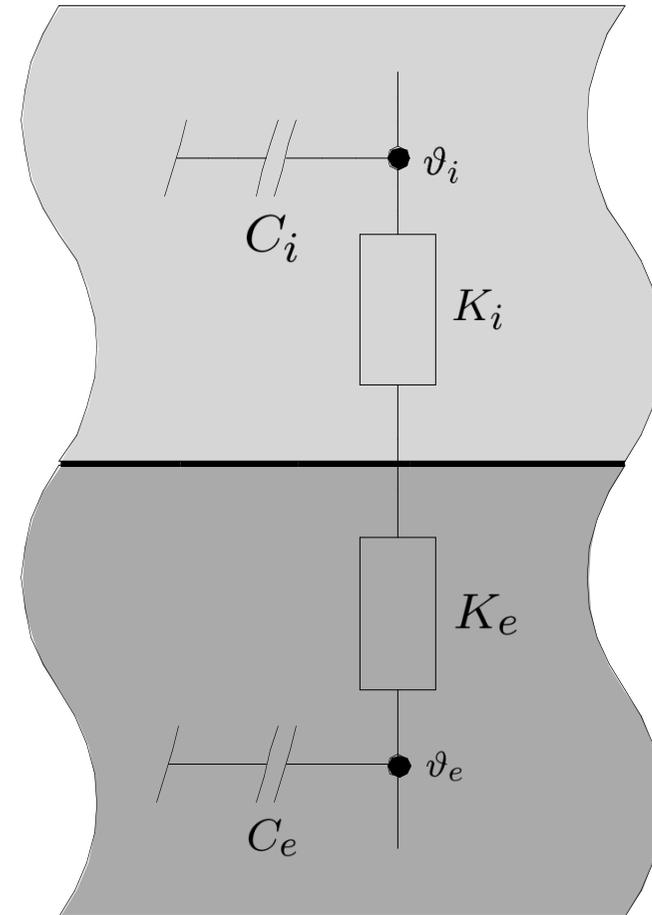
$$C_i = d \cdot A \cdot \rho \cdot c_p$$

Dicke    Fläche    Dichte    Spez. Wärmekapazität

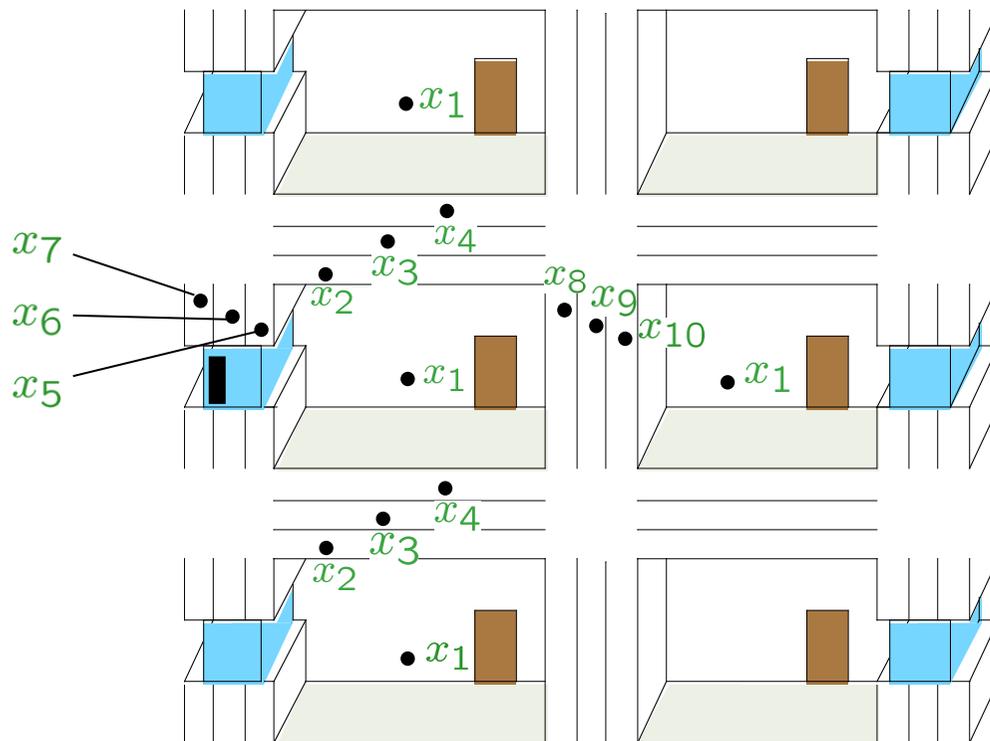
## Wärmetransfer-Koeffizient K

$$1/K_{ie} = 1/K_i + 1/K_e$$

$$\Rightarrow C_i \cdot \frac{d\vartheta_i}{dt} = K_{ie} \cdot (\vartheta_e - \vartheta_i)$$



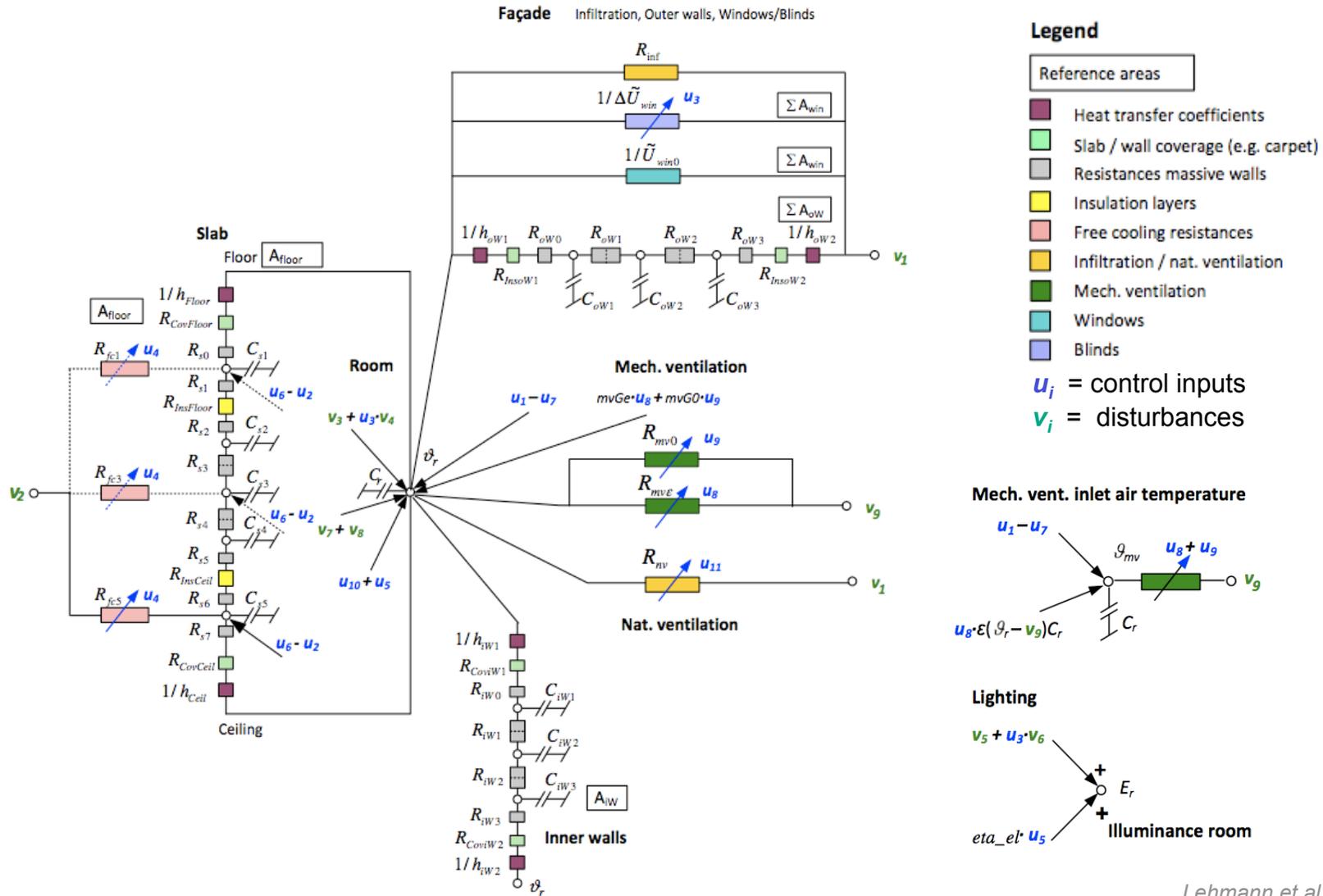
# Gebäudemodell: Zustandsvariablen



- $x_1$  = Raumtemperatur [°C]
- $x_2 \dots x_4$  = Boden-/Deckentemperaturen [°C] \*
- $x_5 \dots x_7$  = Temper. Aussenwandschichten [°C]
- $x_8 \dots x_{10}$  = Temper. Innenwandschichten [°C]

\* Erweitertes Modell:  
zwei zusätzliche Schichten

# Gebäudemodell: Übersicht



Lehmann et al. (2009)

# Gebäudemodell: Gleichungssystem

$$x_{(k+1)} = Ax_{(k)} + B_u u_{(k)} + B_v v_{(k)} + \sum_{i=1}^{n_u} (B_{vu} v_{(k)} + B_{xu} x_{(k)}) u_{i(k)}$$

$$y_{(k)} = Cx_{(k)} + D_u u_{(k)} + D_v v_{(k)} + \sum_{i=1}^{n_u} D_{vu} v_{(k)} u_{i(k)}$$

## Zustände

- $x_1$  room temperature [degC]
- $x_{2..x_6}$  slab temperatures 1...5 [degC]
- $x_{7..x_9}$  inner wall temperatures 1...3 [degC]
- $x_{10..x_{12}}$  outside wall temperatures 1...3 [degC]

## Eingänge/Steuergrößen

- $u_1$  Heating power (mv), positive values = heating [W/m<sup>2</sup>]
- $u_2$  Cooling power (slab), positive values = cooling [W/m<sup>2</sup>]
- $u_3$  Blind position [0: closed ... 1: open] [-]
- $u_4$  Free cooling usage factor [0: off ... 1: max] [-]
- $u_5$  Gains electric lighting [W/m<sup>2</sup>]
- $u_6$  Heating power (slab), positive values = heating [W/m<sup>2</sup>]
- $u_7$  Cooling power (air), positive values = cooling [W/m<sup>2</sup>]
- $u_8$  Air change rate mech. vent. with ERC (eps>0) [1/h]
- $u_9$  Air change rate mech. vent. without ERC [1/h]
- $u_{10}$  Heating power (radiator), positive values = heating [W/m<sup>2</sup>]
- $u_{11}$  Air change rate nat. vent. [1/h]

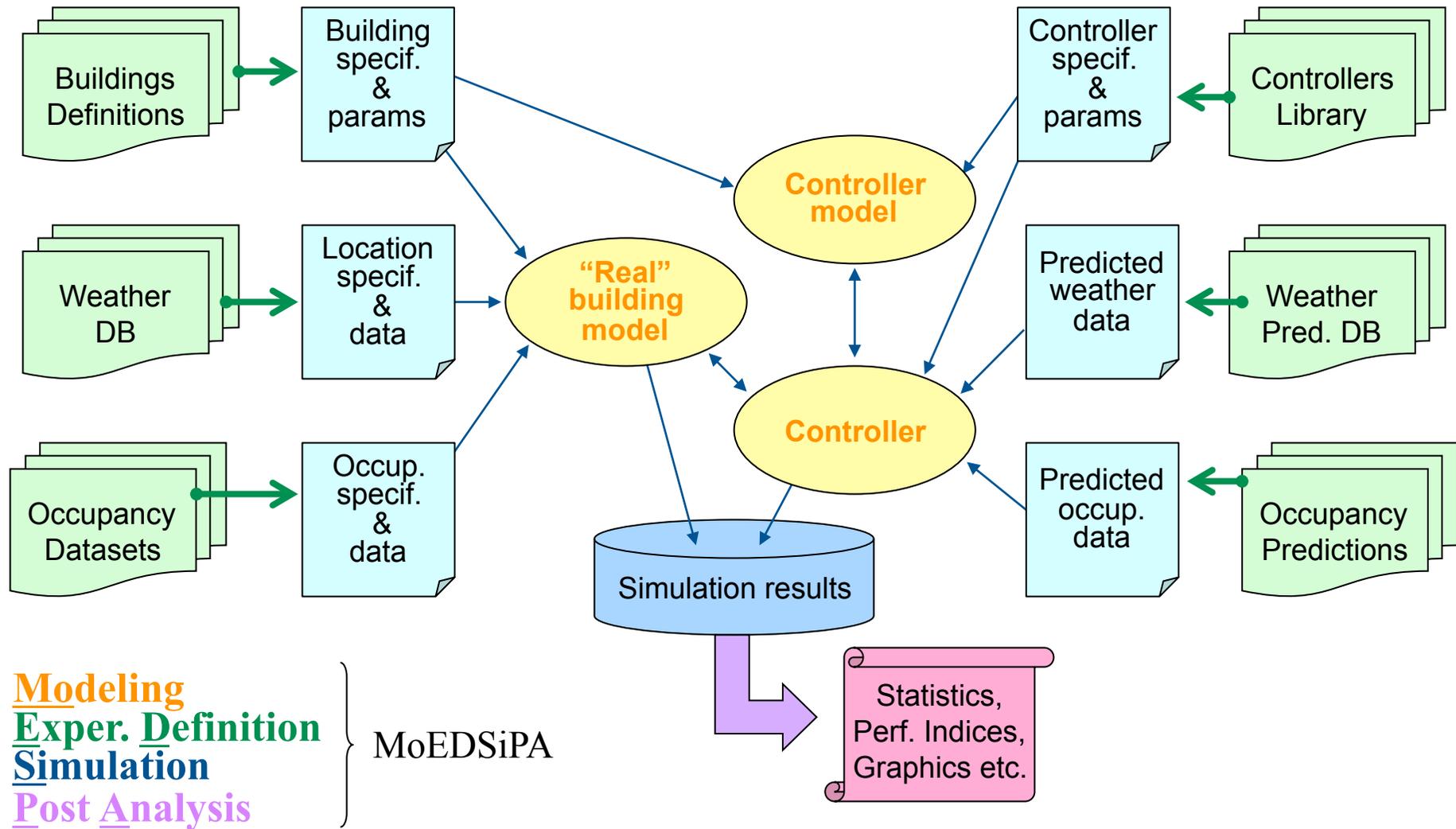
## Störgrößen

- $v_1$  Outside air temperature [degC]
- $v_2$  Free cooling temperature [degC]
- $v_3$  Solar gains with fully closed blinds [W/m<sup>2</sup>]
- $v_4$  Additional solar gains with open blinds [W/m<sup>2</sup>]
- $v_5$  Daylight illuminance with fully closed blinds [lux]
- $v_6$  Additional daylight illuminance with open blinds [lux]
- $v_7$  Internal gains persons [W/m<sup>2</sup>]
- $v_8$  Internal gains equipment [W/m<sup>2</sup>]
- $v_9$  Fresh air temperature mech. ventilation [degC]
- $v_{10}$  Air change rate infiltration [1/h]

## Ausgänge

- $y_1$  room temperature [degC]
- $y_2$  room illuminance [lux]
- $y_3$  ceiling surface temperature [degC]
- $y_4$  Sum of air change rate mech. vent  $u_8+u_9$  [1/h]
- $y_5$  Total air change rate [1/h]
- $y_6$  Inlet temperature overheat (balance  $\leq 0$  ok) [W/m<sup>2</sup>]
- $y_7$  Inlet temperature overcool, (balance  $\geq 0$  ok) [W/m<sup>2</sup>]

# Simulationsumgebung: Übersicht



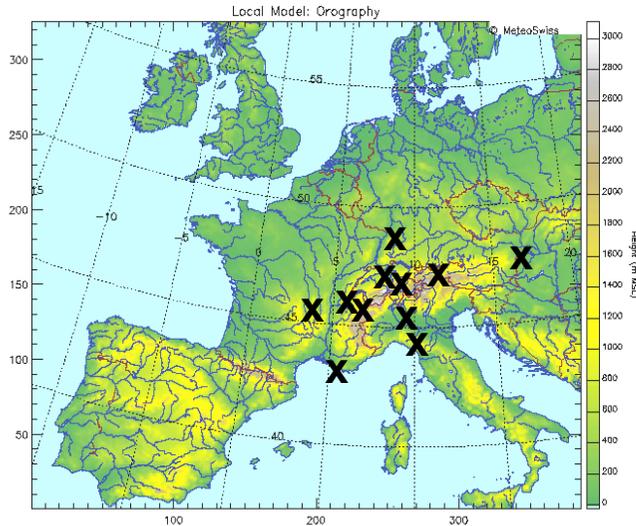
# “Building Automation and Control Laboratory” – BACLab

---

Komponenten:

1. **“BACSimulate”, “BACPostProc”, “BACPars” etc.**
  - Modellierung & Simulation einzelner Gebäudezonen/Räume
  - Inkl. Bibliothek von Regelalgorithmen und Post-Processing
  - 242 MATLAB-Funktionen (ca. 14'000 Zeilen Code)
2. **“BuSyDB” (Building Systems Data Base)**
  - Gebäude- und Haustechniksysteme-DB
  - Abfrage mittels “TCP/IP socket communication”
  - Klient erhält als Abfrageresultat Excel-Dateien
  - Grosse Anzahl standardisierter Fälle
3. **“OCWDB” (OptiControl occupancy and Weather Data Base)**
  - Wetter- & Belegungsdaten-DB
  - php/SQL Schnittstelle für Tabellen und Dateien

# OCWDB: Verfügbare Daten



Zürich  
 Basel-Binningen  
 Genève-Cointrin  
 Lugano  
 Modena  
 Marseille-Marignane  
 Clermont-Ferrand  
 Mannheim  
 Hohenpeissenberg  
 Wien Hohe Warte

## Wetterdaten:

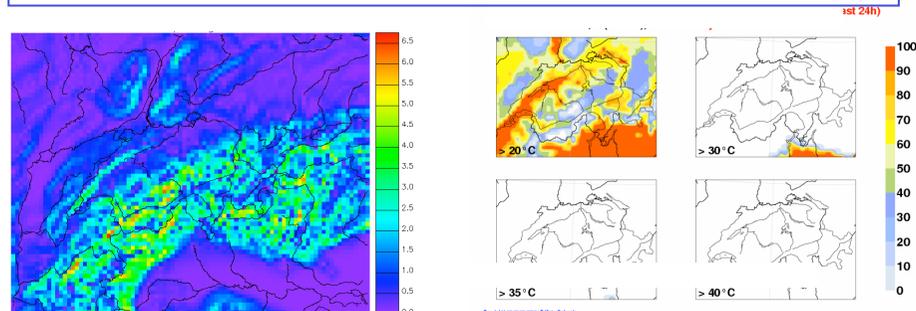
- Stündliche Messungen aus Jahren 2001-2007
- Design Reference Years (nach SIA)

## Wettervorhersagen:

- “Persistenz”: Wetter der letzten 24h wird rezykliert
- COSMO 7 Wettervorhersagemodell der MeteoSchweiz

### Deterministische Vorhersagen

- 2 x pro Tag für die kommenden 72 Stunden
- Gebiet Zentral- und Nordeuropa
- 7 km Maschenweite
- 45 Schichten in der Vertikalen



# Simulationsexperimente

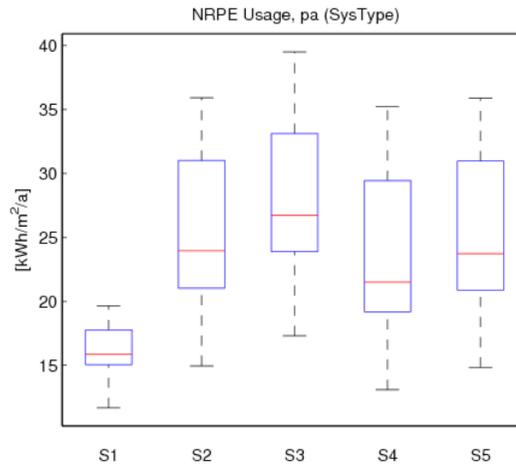
<b>No</b>	<b>Factor</b>	<b>Variants Considered</b>
1	Building System	S1, S2, S3, S4, S5
2	Energy System	Heat: earth coupled heat pump Cold: mechanical (compression) chiller
3	Dimensioning Strategy	Ds – Scant
4	Cost Function	NRPE – Non-Renewable Primary Energy usage MC – Monetary Cost (diurnally varying tariff)
5	Thermal Comfort	Aw – No set-back, wide comfort range Bw – Set-back allowed, wide comfort range An – No set-back, narrow comfort range Bn – Set-back allowed, narrow comf. range
6	Ventilation Strategy	none – No ventilation (S1) V – Two-stage ventilation control (S2–S5) W – CO2-based control (S2–S5)
7	Illuminance Comfort	Occupancy dependent, bright, anti-glare
8	Site	SMA – Zürich-Fluntern LUG – Lugano WHW – Wien Hohe Warte MSM – Marseille-Marignane
9	Weather Data Set	DM – Average Design Reference Year
10	Façade Orientation	N, S, SW (corner room), SE (corner room)
11	Construction Type	h – heavyweight l – lightweight
12	Building Standard	sa – Swiss average ph – Passive house
13	Window Area Fraction	wl – low wh – high
14	Internal Gains Level	il – low ih – high

# Beispielresultate: “Performance Bound”

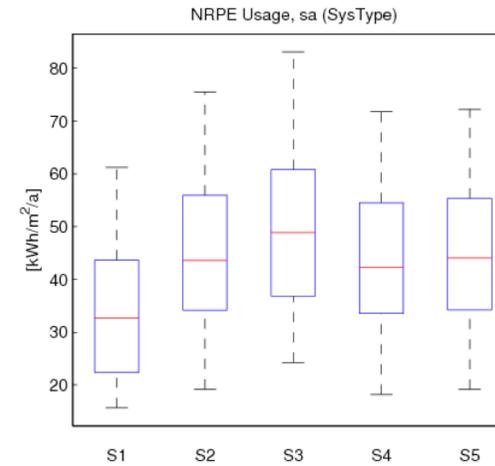
Gebäudeklasse I

Energieverbrauch

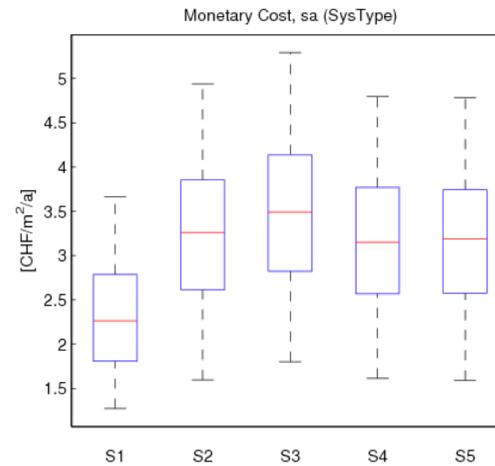
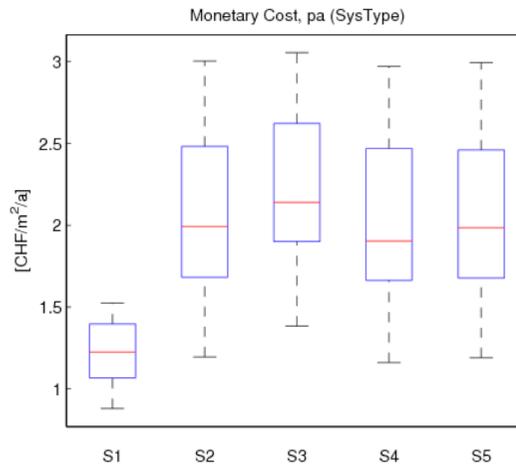
*Passivhaus*



*Schweizer Mittelwert*



Monetäre Kosten



Gyalistras et al. (2009)

# Regelbasierte Regelung (RBC-1)

- Messung der solaren Gewinne mittels Strahlungs-Sensoren an der Fassade
- Storenposition wird mittels der folgenden Regeln festgelegt:

```
if ( solar gains < threshold value )  
    blinds are fully opened  
else  
    if (room is not occupied)  
        blinds are fully closed  
    else  
        blinds are closed to a predefined position that attempts  
        to maintain luminance setpoint (if possible)  
    end  
end  
end
```

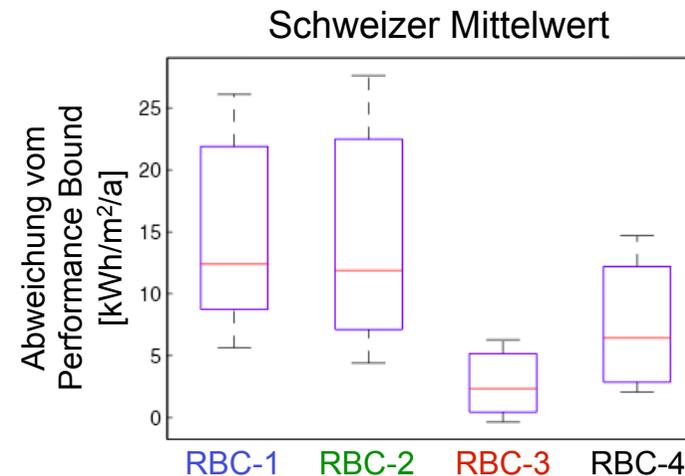
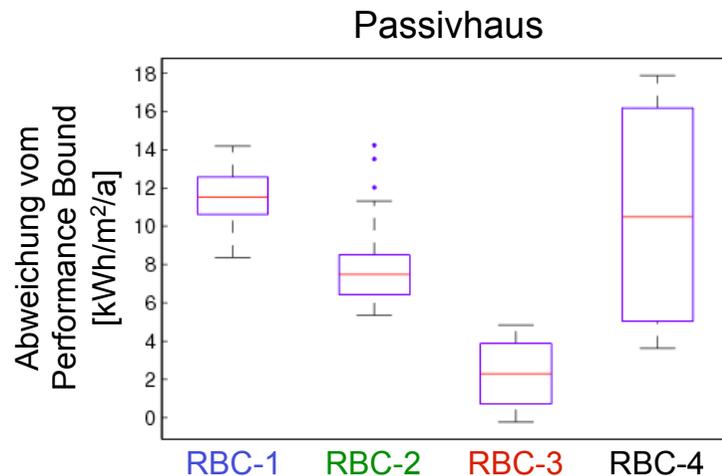
- Freie Kühlung, Natürliche Lüftung und ERG: ebenfalls Regelbasierte Regelung.
- Alle “schnellen” Gewerke (Radiatoren, elektr. Beleuchtung etc.) werden instantan perfekt geregelt (Energie- oder Kostenoptimal).

Gwerder et al. (2009)

# Theoretische Einsparpotentiale Regelbasierter Storen-Regelstrategien

System S2, Gebäudekategorie I

	<i>RBC-1</i>	<i>RBC-2</i>	<i>RBC-3</i>	<i>RBC-4</i>
<b>Erlaubte Storenposition</b>	offen, 50%, zu	kontinuierlich	kontinuierlich	kontinuierlich
<b>Häufigkeit der Repositionierung</b>	stündlich	kontinuierlich	kontinuierlich	stündlich
<b>Verwendete Messdaten</b>	aktuell	aktuell	aktuell + Vergangenheit	aktuell + Vergangenheit



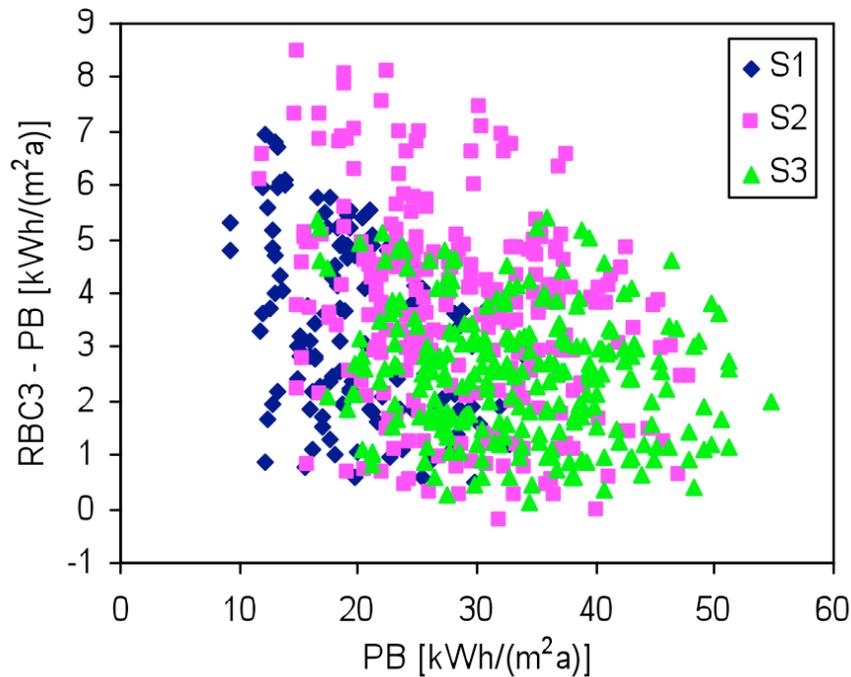
Gyalistras et al. (2009)

# Theoretische Einsparpotentiale für die Storen-Regelstrategie "RBC-3"

Systeme S1–S3, Gebäudekategorien I+II

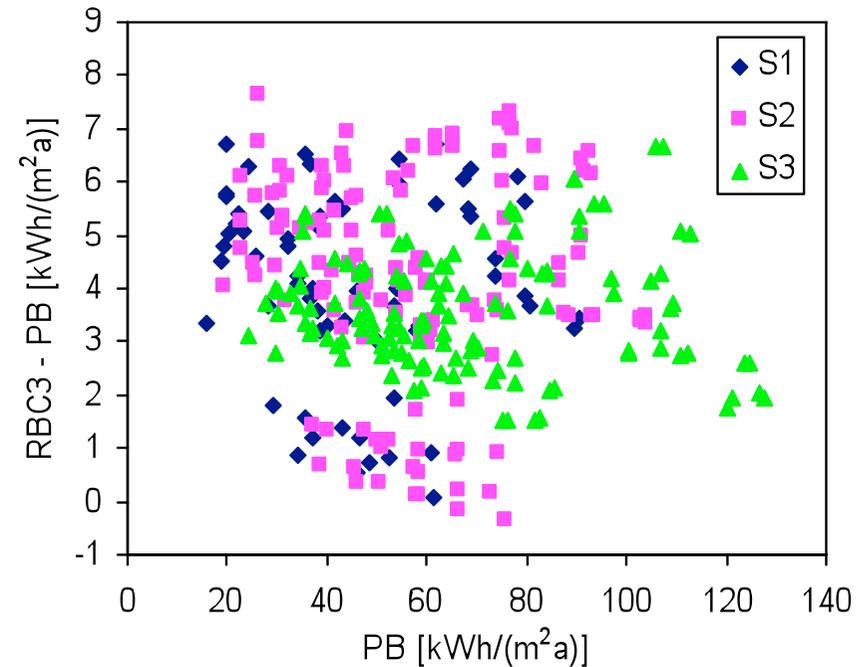
## Passivhaus

Total cost NRPE / pa / building cat. I+II



## Schweizer Mittelwert

Total cost NRPE / sa / building cat. I+II



Gyalistras et al. (2009)

# Potential-Analyse für “RBC-3”

Regressionsgleichung

$$Y_i = \alpha + \beta \cdot (S_i R_i) + \gamma \cdot CT_i + \delta \cdot IGL_i + \varepsilon_i$$

wobei

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$

Regressionskoeffizienten

$\varepsilon$

Zufällige Störgrösse

$$S = g \cdot A_{win} / A_{floor}$$

Spezifische Solargewinnfläche  
( $g$  = solarer Gewinnfaktor der Fenster)

$R$

Jahresmittel des Mittelwerts aller vertikalen Strahlungskomponenten

$CT$

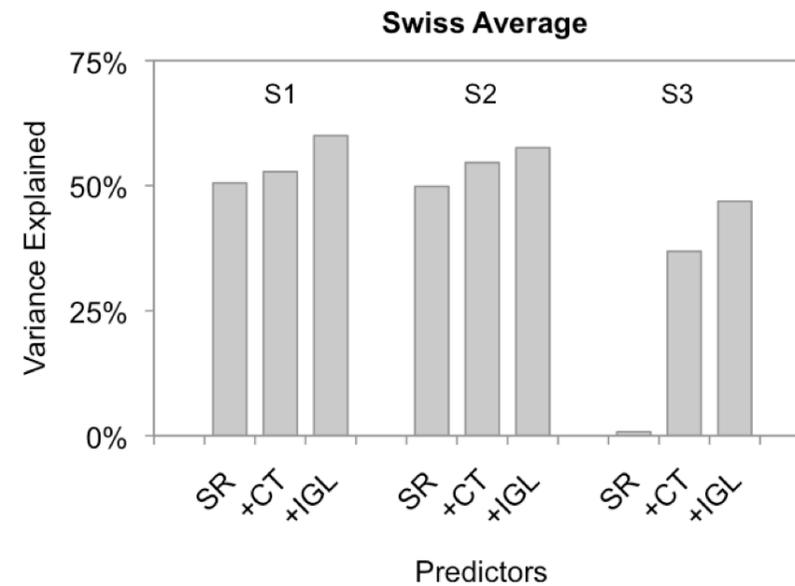
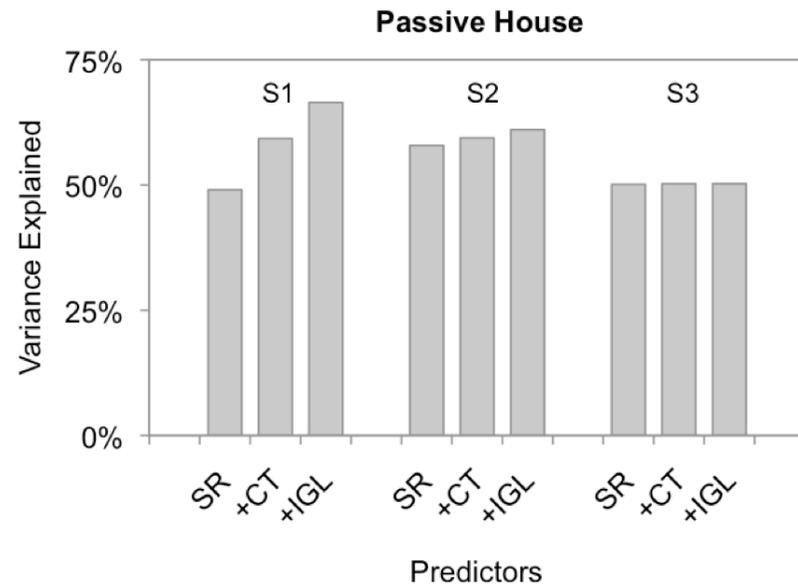
“Construction Type” (“schwer”/“leicht”; binär kodiert)

$IGL$

“Internal Gains Level” (“hoch”/“tief”; binär kodiert)

# Potential-Analyse: Güte der Regression ( $r^2$ )

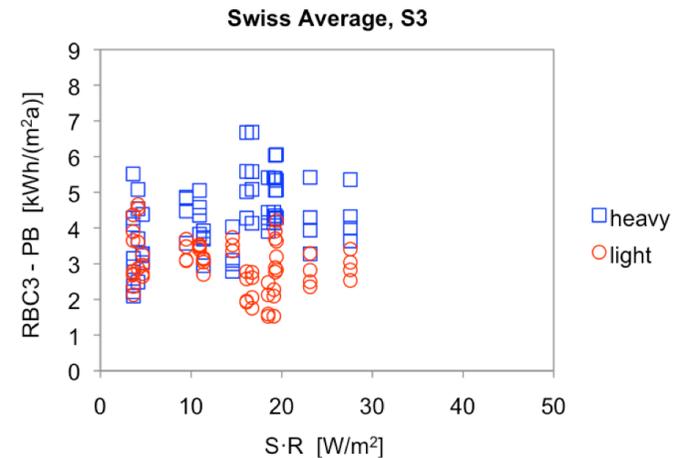
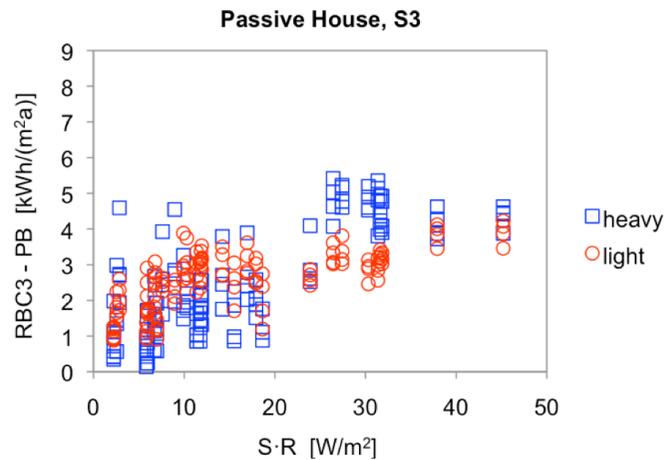
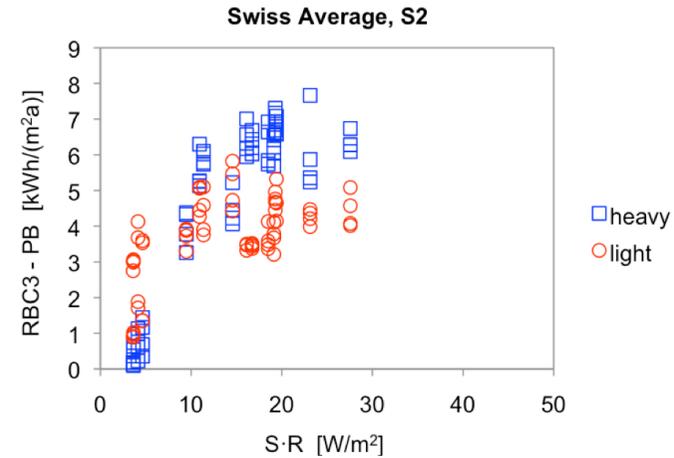
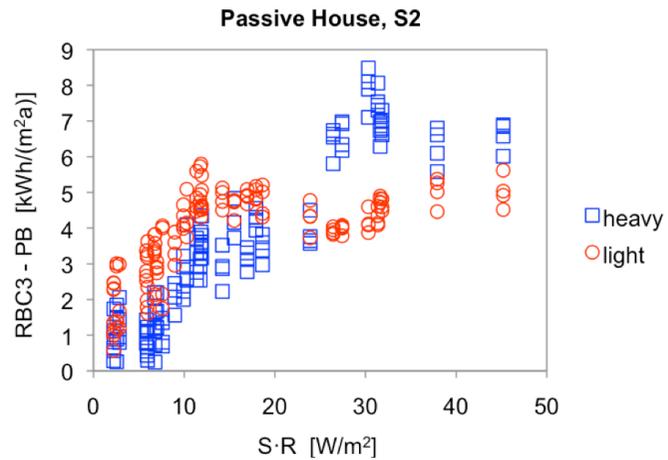
Systeme S1–S3, Gebäudekategorien I+II



Gyalistras et al. (2009)

# Potential-Analyse: Streudiagramme

Systeme S2+S3, Gebäudekategorien I+II

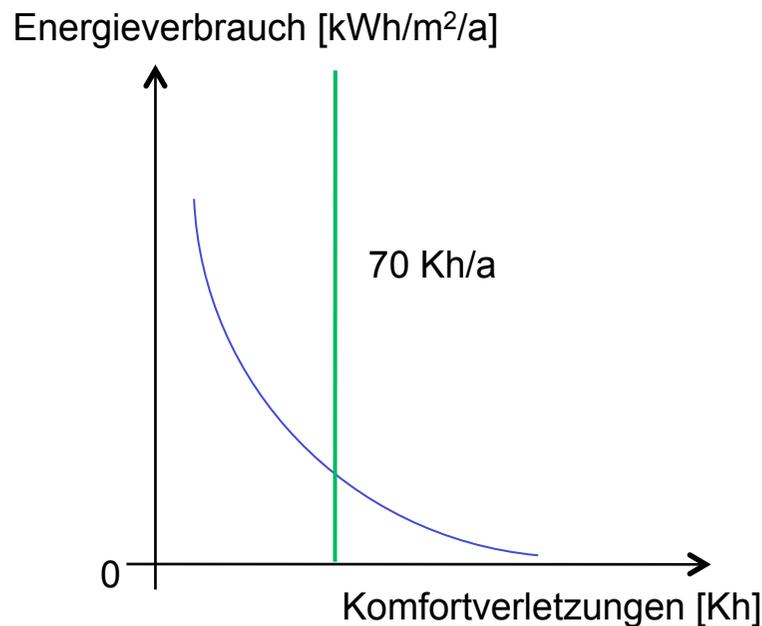


Gyalistras et al. (2009)

# Vergleich von Regelalgorithmen

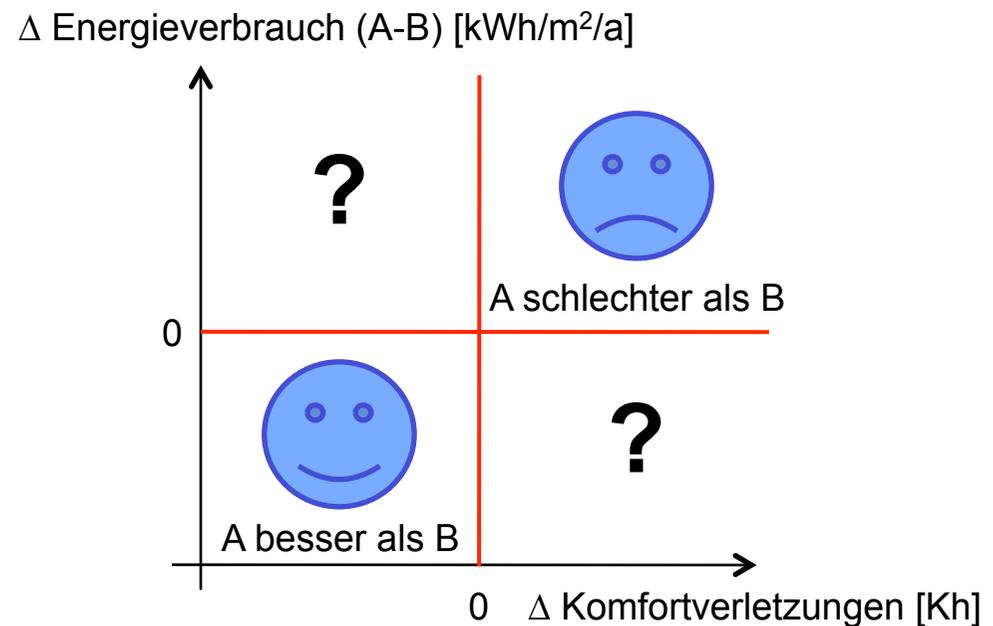
## Kompromiss zwischen Energieverbrauch und Komfort

- Komfort-Level kann angepasst werden
- Norm: Grenze bei "70 Kh/a"



## Vergleich der Regler A und B

- 4 mögliche Fälle
- 2 Fälle: Resultat nicht definiert (Regler müssen auf gleichen Energieverbrauch oder gleichen Komfort eingestellt werden)



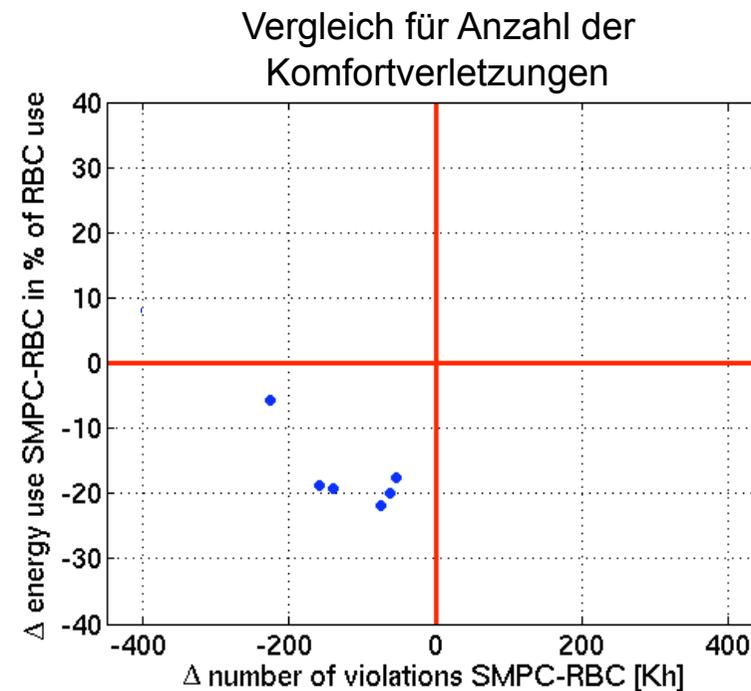
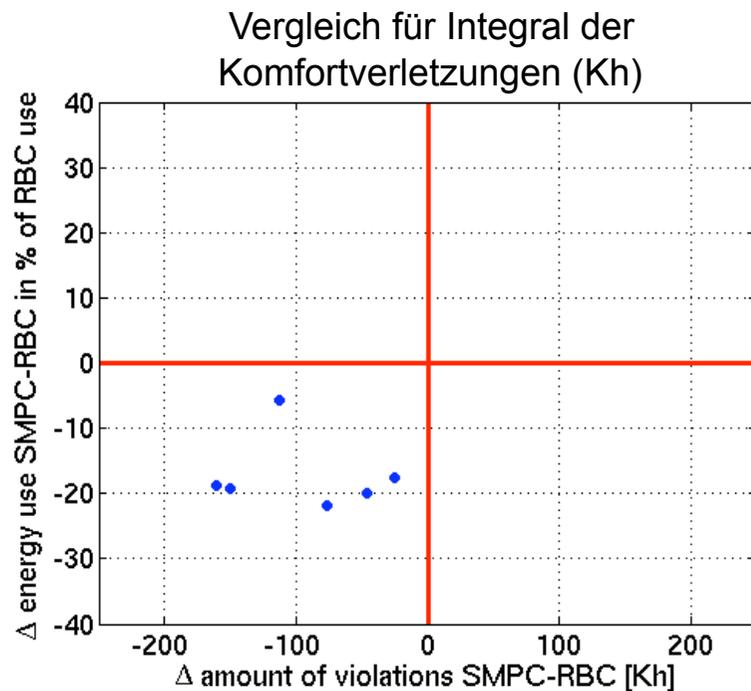
Oldewurtel et al. (2009)

# Vergleich der Regelalgorithmen “S-MPC” und “RBC-4” (Teil 1/2)

System S2; 6 repräsentative Fälle

**S-MPC:** Stochastischer MPC-Algorithmus.

Berücksichtigt Unsicherheiten in den Wettervorhersagen.



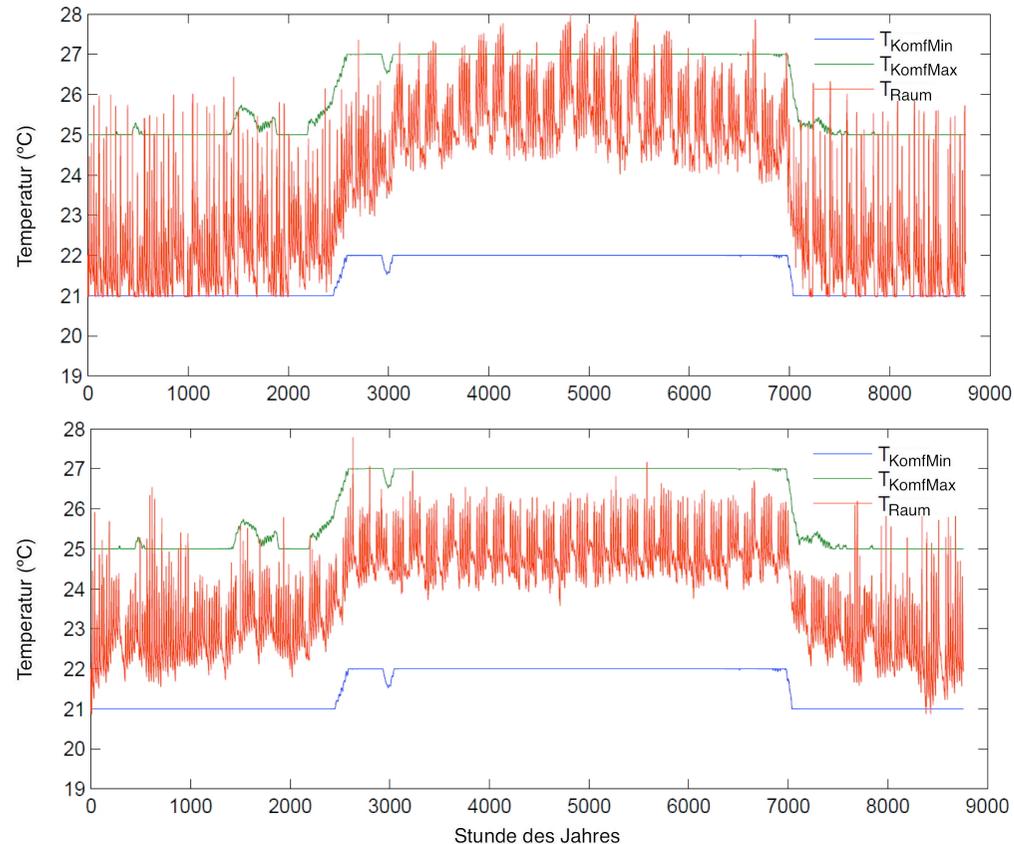
→ S-MPC übertrifft den regelbasierten Algorithmus

Oldewurtel et al. (2009)

# Vergleich der Regelalgorithmen “S-MPC” und “RBC-4” (Teil 2/2)

System S2, Marseille 2007, S-Fassade, Schweizer Mittelwert, schwere Bauweise

RBC-4



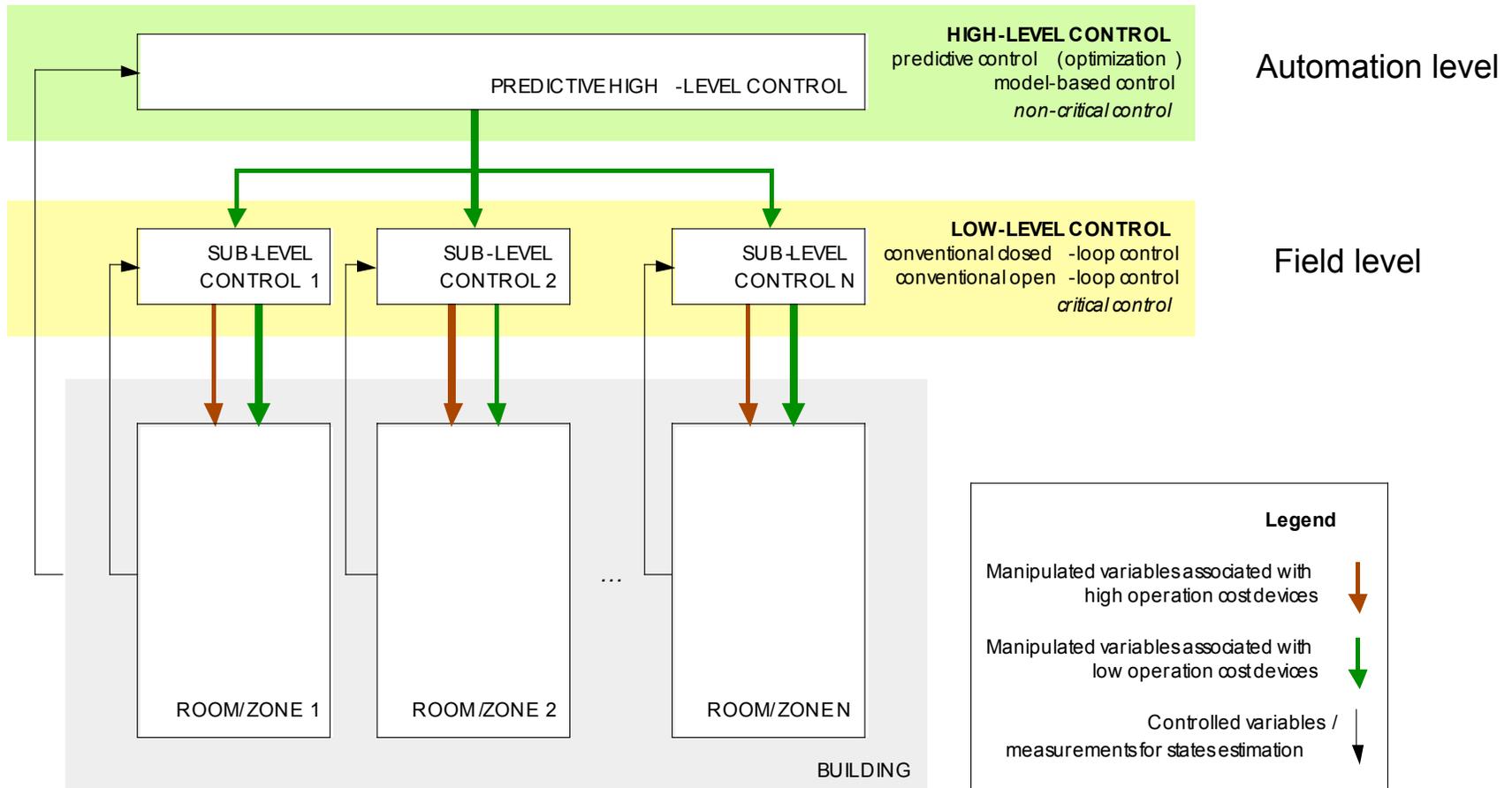
S-MPC

→ Verbesserter Komfort bei tieferem Energieverbrauch (-6%)

Oldewurtel et al. (2009)

# Umsetzung: Herausforderungen für den MPC Ansatz (1/2)

- Einbettung in existierende BAC-Systeme



# Umsetzung: Herausforderungen für den MPC Ansatz (2/2)

---

- Vereinfachung
- Nachweis des Zusatznutzens (Nutzen-Kosten Analyse)
- Inbetriebnahme & Parametereinstellung
- Robustheit
- Eingangsdaten (Zustandsschätzung, Wetter, Belegung)
- Plausibilität / Akzeptanz durch Nutzer

# Schlussfolgerungen

---

## Methodische Aspekte

- Effekte unterschiedlicher Regelstrategien sind extrem fallabhängig.
- Passende Software und Datensätze sind für Abschätzungen unabkömmlich.
- “Performance Bound”-Konzept hilfreich zur Ermittlung verbesserter Strategien.

## Potential der prädiktiven Regelung für die Integrierte Raumautomation

- Demonstration erheblicher Energie-Einsparungspotentiale.
- Grösste absolute Potentiale für das komplexeste Haustechniksystem (S2).
- Solare Gewinne erklären > 50% der Varianz der Potentiale .
- Ausnahme: Gebäude vom Baustandard “Schweizer Mittelwert” unter System S3.
- Grosse thermische Masse von Vorteil nur bei hohen solaren Gewinnen.

## Modellprädiktive Kontrolle

- Versprechende Resultate: Senkung des Energieverbrauchs bei erhöhtem Komfort.
- Praktische Umsetzung anforderungsreich.