

Modellprädiktive Regelung einer Test-Box – Ergebnisse des Projektes MPC-Boxes

Martin Felix Pichler
martin.pichler@tugraz.at



Überblick

- Einleitung
- Grundprinzip Modellprädiktive Regelung
- Forschungsprojekt MPC-Boxes
- Ergebnisse aus der realen Messung

Einleitung

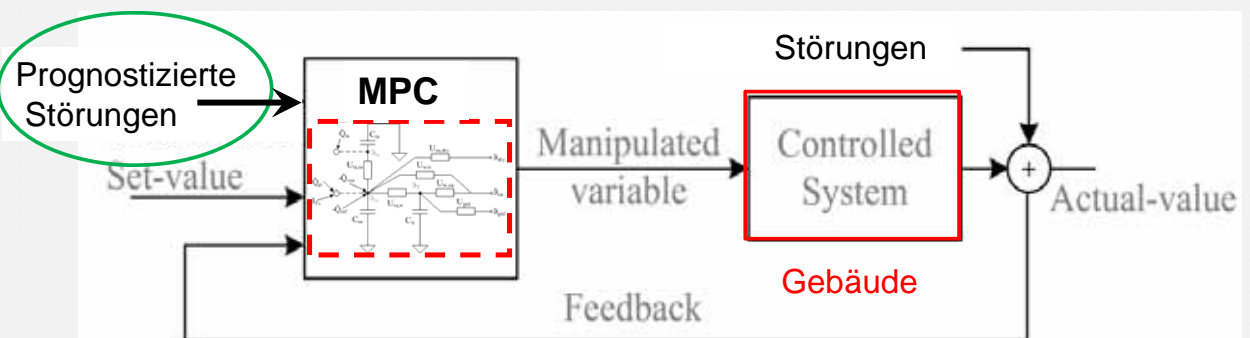
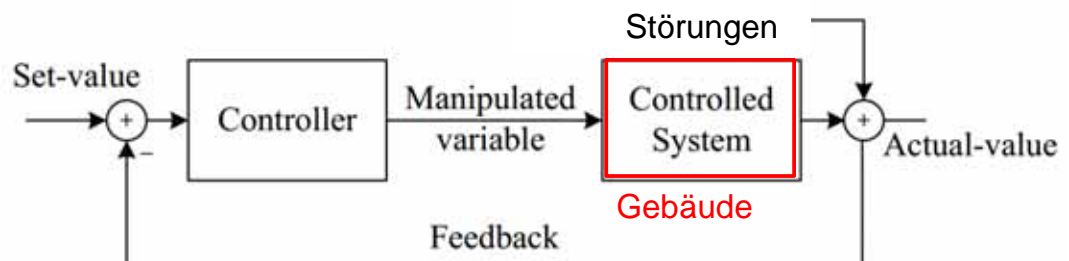
- Die Heizungsregelung mit Wetterdaten ist nicht neu (erstes Paper 1985)

- Konnex zum Alltag

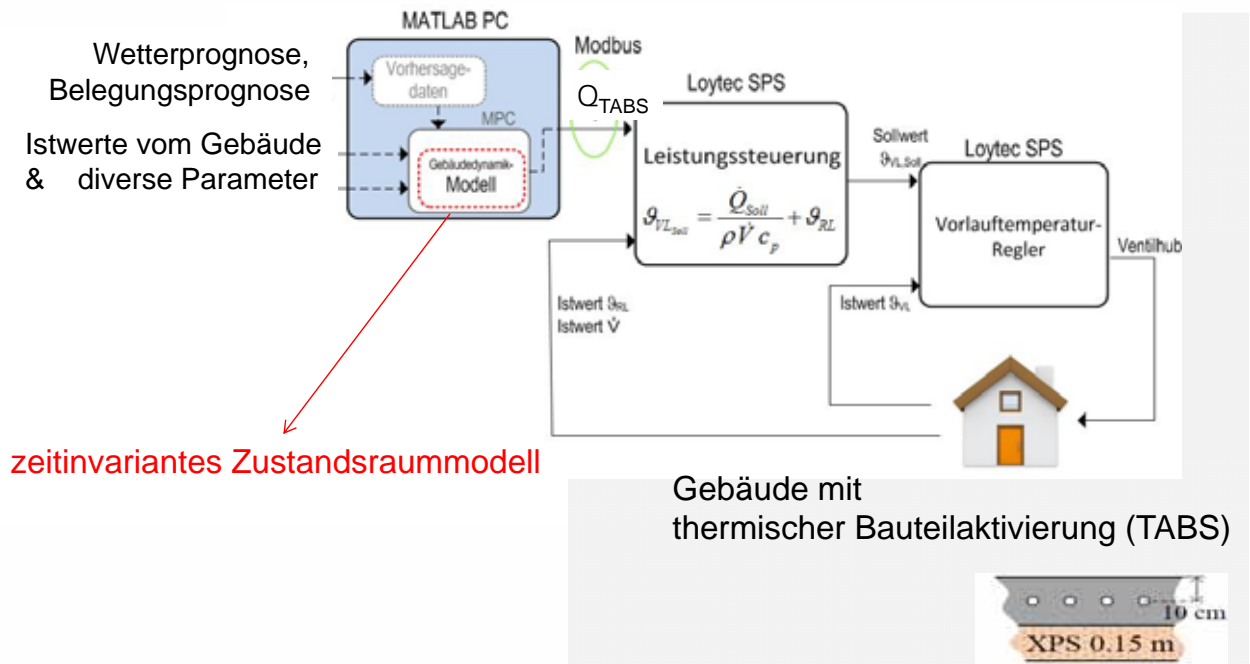


- Interessant mit steigender therm. Trägheit

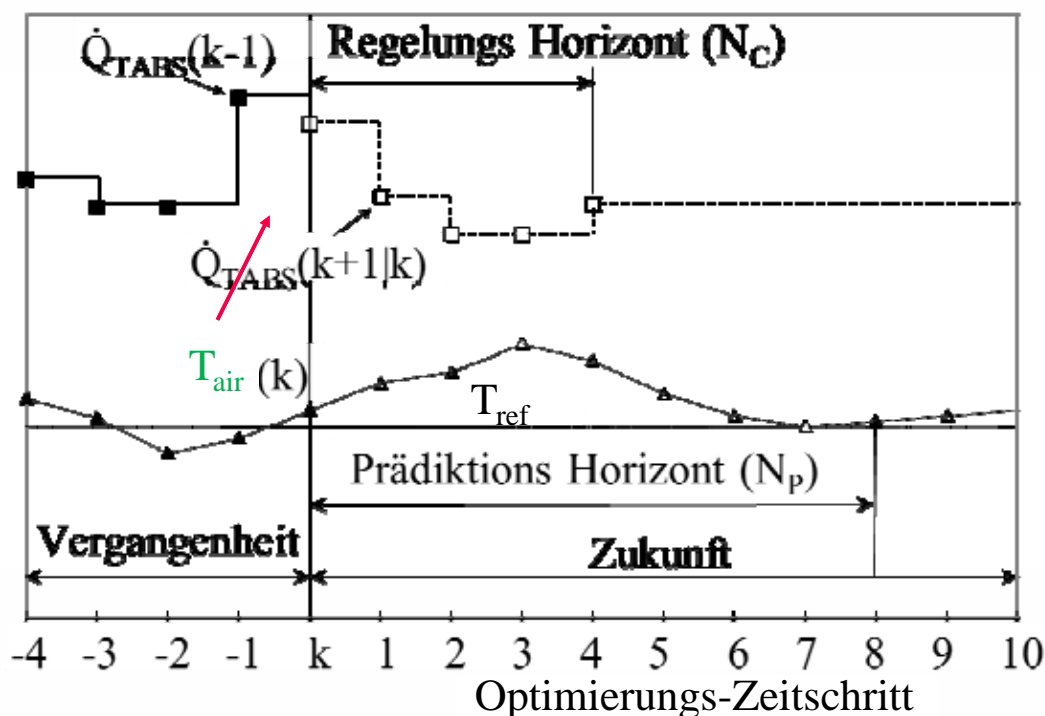
Standard versus Modell Prädiktive Regelung (MPC)



Gesamter Regelkreis Bsp. Gebäude



Grundprinzip Prädiktive Regelung



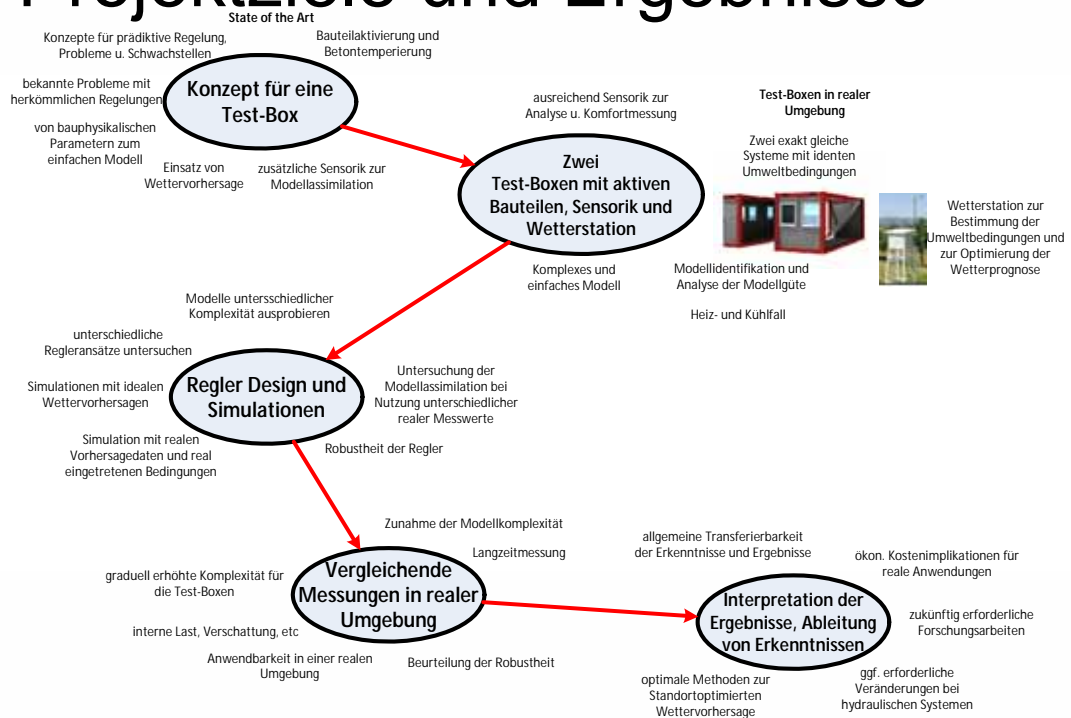
Was kann eine (Modell) prädiktive Regelung leisten

- Ausnutzung einer zulässigen (Komfort-)Bandbreite, d.h. kein rigides Verhalten
- Lastverschiebung abhängig von den Randbedingungen
 - Strahlung
 - Außentemperatur
 - Aktueller Wärme(Strom)preis
- Mögliche Optimierungsziele
 - Energieverbrauch
 - ökonomische Kosten
 - etc.

Anwendung

Forschungsprojekt MPC-Boxes

Projektziele und Ergebnisse



Motivation – Fragen

- Praktisches **Energie-Einsparungspotential** 9% bis 28% bei wenig Komfort-Verletzung
- Publizierte Ergebnisse beziehen sich überwiegend auf Simulationsstudien
- Kaum Vergleichsmöglichkeit mit realen Gebäuden
- Ist **monovalenter Betrieb** mit thermisch aktivierten Bauteilsystemen (TABS) möglich?

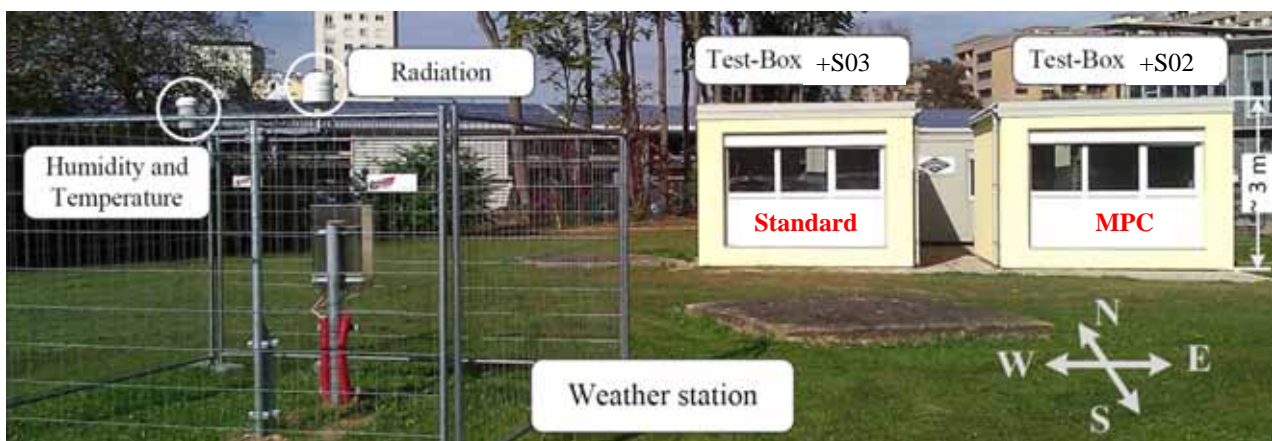
→ Projekt MPC-Boxes

Überblick -- Hauptteil

- Experimenteller Aufbau
- Gleichheit der Testboxen
- Übersicht prädiktive Regelung und Reglermodell
- Güte des identifizierten Modells
- **Ergebnisse**

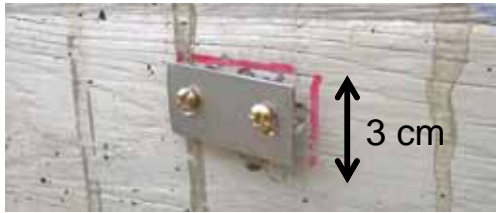
MPC-Boxes Experimenteller Aufbau

- Standort Inffeldgasse Graz, Fertigstellung Herbst 2014
- HWB ~ 64 kWh/(m²a) bei interner Last von 3,75 W/m²



Messstellen

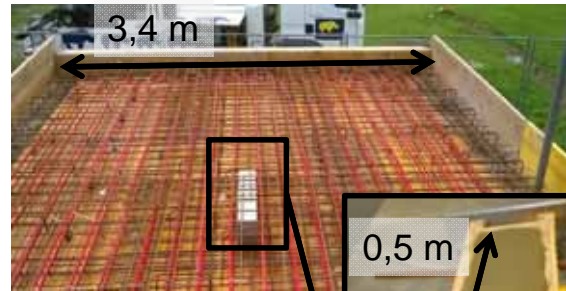
Oberflächentemperaturmessung



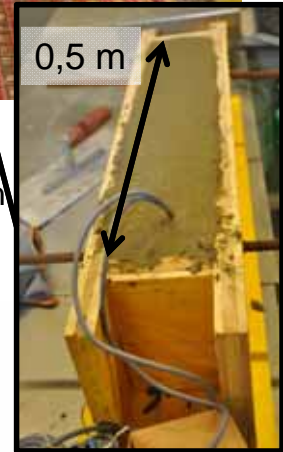
Messstelle mit Pt1000 Sensor



Decke vor dem Betonieren mit „Proband“



„Proband“ nach Betonieren
im Labor mit Sensorleitungen



- Pt1000, Genauigkeit: 0,1 K
Klasse 1/3 Din (IEC 60751:2008)
- Genauigkeit der Messkette: < 0,2 K

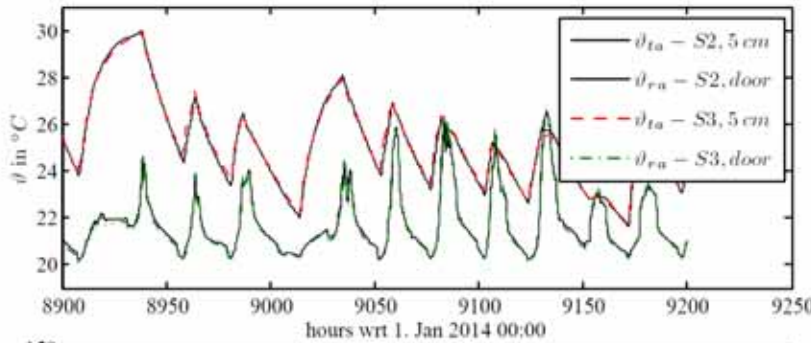
Gleichheit der Boxen

- Blower-door Messung
 - Messbereich 25-70 Pa
 - **n50: 1,51 h⁻¹ und 1,58 h⁻¹**
 - Unterschied vernachlässigbar
 - $n_{inf} = 0,11$ (OeNORM B 8110-6:2010)



- Thermophysikalischer Vergleich
 - Hystereseregler für Raumtemperatur in beiden Boxen
 - Schaltschwellen: 20 °C Ein, 24 °C Aus
 - Vergleich der Bauteil- und Raumtemperatur etc.

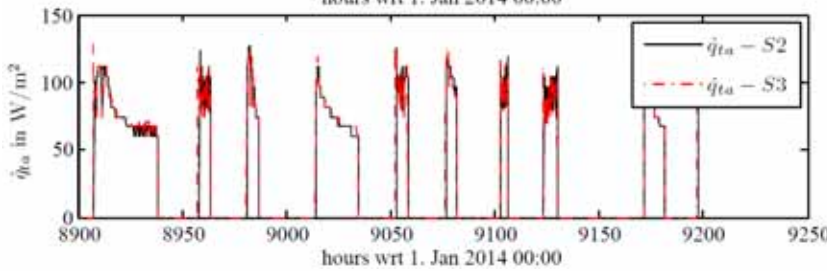
Thermophysikalischer Vergleich



Auswertung eines Messintervalls von 1000 h

$$\Delta y := y_{S3} - y_{S2}$$

Variable	Metrik		
	$\text{mean}(\Delta y)$	$\sigma_{\Delta y}$	$\max \Delta y $
ϑ_{ta}	K	K	K
ϑ_{ra}	0.07	0.16	0.90
	0.00	0.16	2.43

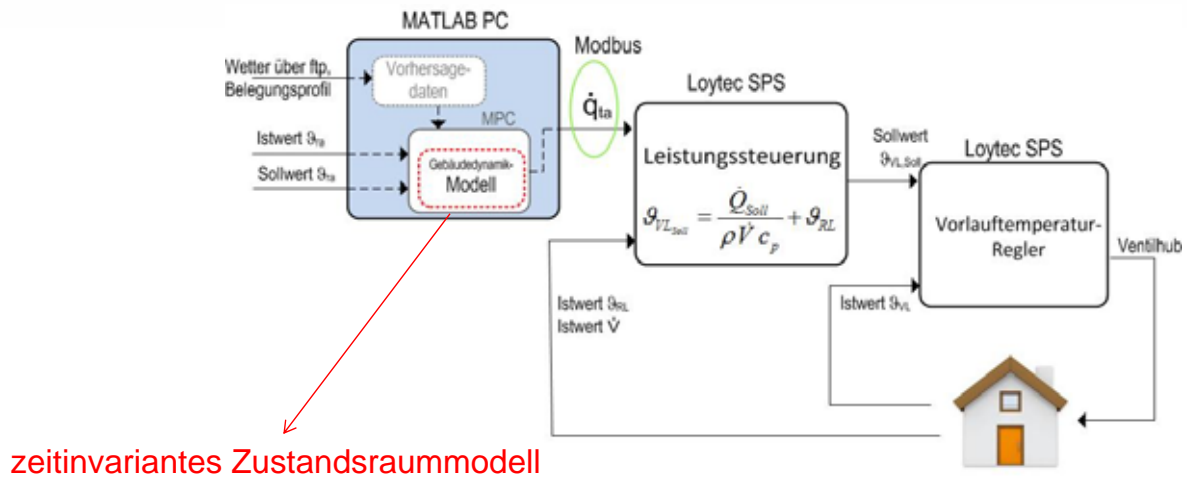


$$\begin{aligned} \vartheta_{ta} &= T_{TABS} \\ \vartheta_{ra} &= T_{air} \end{aligned}$$

MPC-Betrieb in Aller Kürze

- Wettervorhersage wird jede Stunde aktualisiert
- Modellprädiktiver Regler (MPC) mit Matlab umgesetzt
- MPC-Betrieb läuft seit Sommer 2015

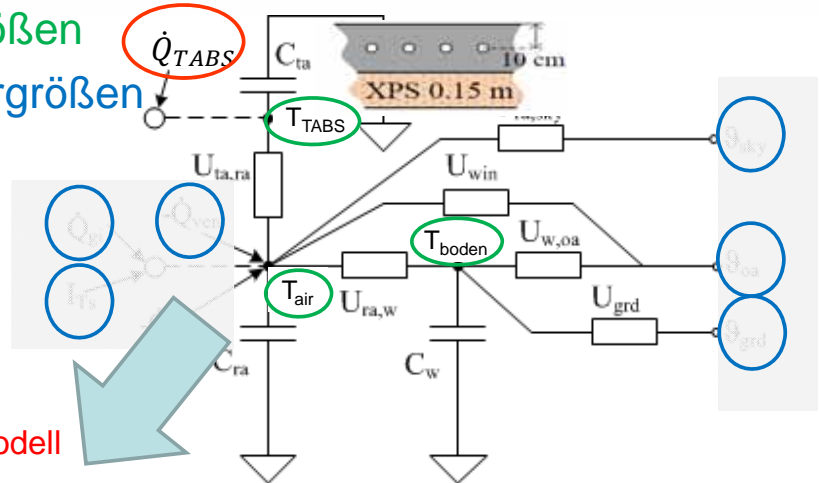
Übersicht gesamter Regelkreis



Reglermodell – RC Formalismus

- Modellausgangsgrößen
- Vorhergesagte Störgrößen
- Stellgröße

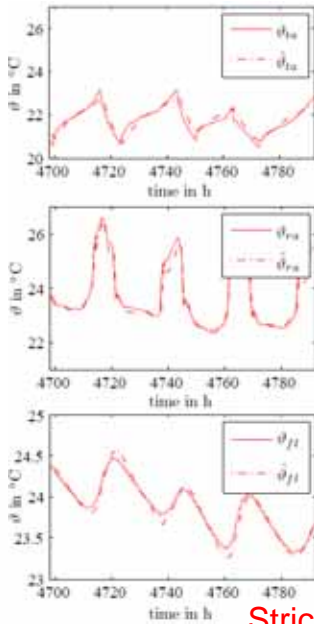
zeitinvariantes Zustandsraummodell



$$\begin{bmatrix} \dot{\vartheta}_{ta} \\ \dot{\vartheta}_{ra} \\ \dot{\vartheta}_{fl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_{ta,ra}A}{C_{ta}} & -\frac{U_{ta,ra}A}{C_{ta}} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vartheta_{ta} \\ \vartheta_{ra} \\ \vartheta_{fl} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{ta}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_{ta} \\ \vdots \\ \vartheta_{grd} \end{bmatrix}$$

Wiedergabe-Güte eines identifizierten Modells

Identifikationsdaten

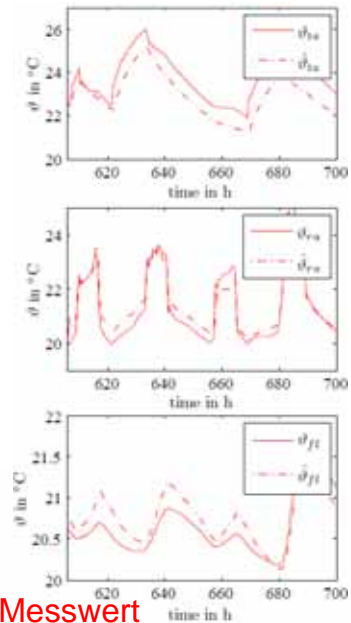


Bauteiltemperatur (Decke)

Raumlufttemperatur

Bauteiltemperatur (Boden)

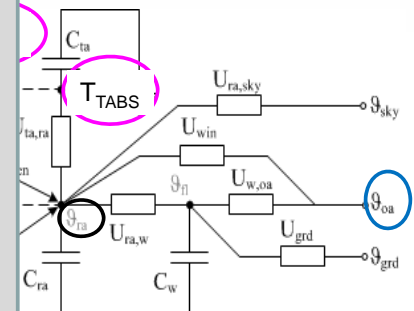
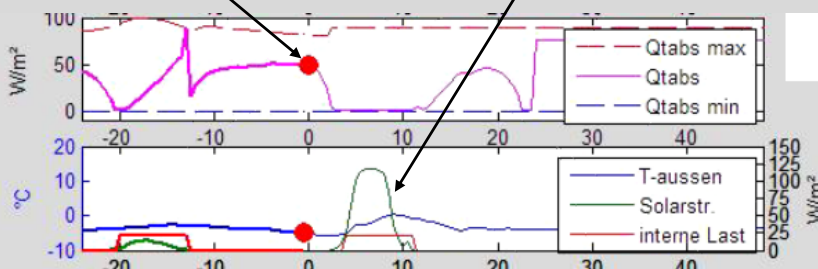
Validierungsdaten



Strichpunktiert Modell, durchgezogen Messwert

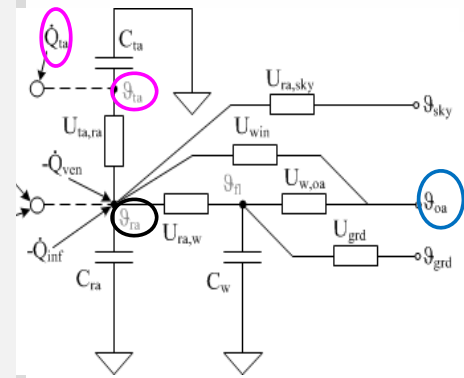
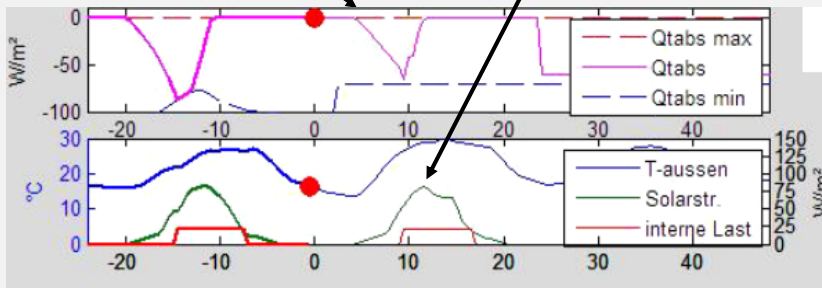
MPC-Betrieb im Winter -- Simulation

Zurückfahren der Heizung bereits einige Stunden vor Auftreten der Solarstrahlung

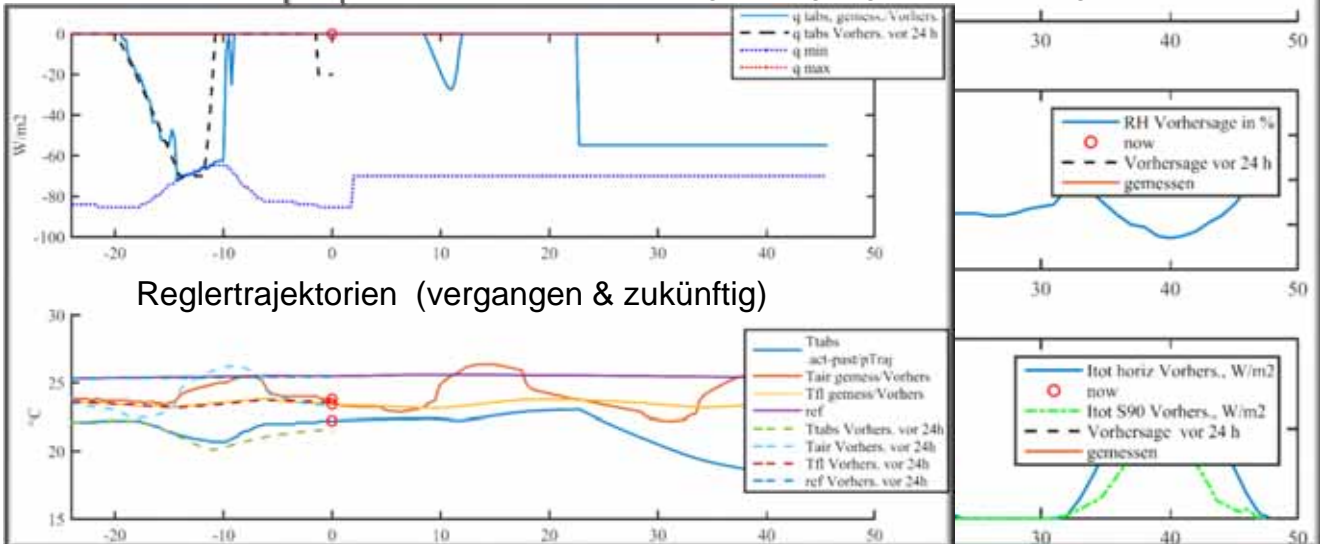
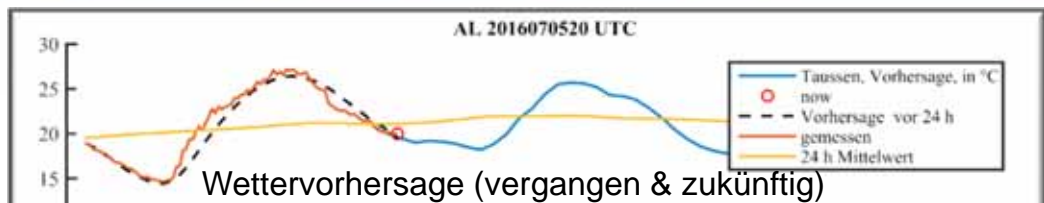


MPC-Betrieb im Sommer -- Simulation

Vorkühlung bereits ~5 Stunden vor auftreten der Solarlast



„Liveschaltung Sommer“

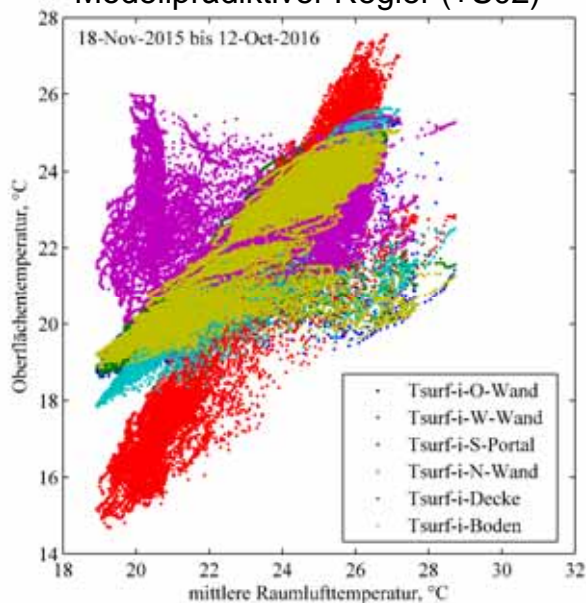


Randbedingungen

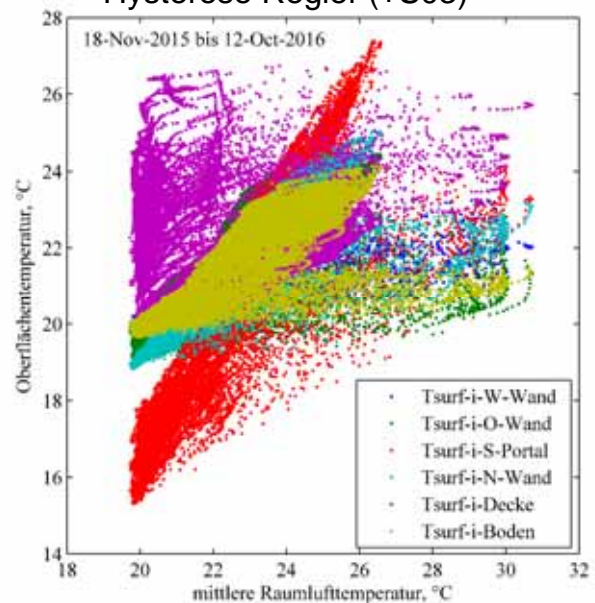
- Raumlufttemperatur (T_{air}): Mittel zweier Messpositionen im Raum
- Interne Lasten 22.4 W/m^2 von 9:00 bis 17:00
- Standardregelung – Hysterese Regler :
 - Heizen: EIN: $T_{air} < 20^\circ\text{C}$; AUS: $T_{air} > 22^\circ\text{C}$
 - Kühlen: EIN: $T_{air} > 24^\circ\text{C}$; AUS: $T_{air} < 22^\circ\text{C}$
- MPC Temperatur Limits:
 - Minimale T_{air} 20°C
 - Maximale T_{air} 26°C

Auswertung der Oberflächentemperaturen

Modellprädiktiver Regler (+S02)



Hysterese Regler (+S03)

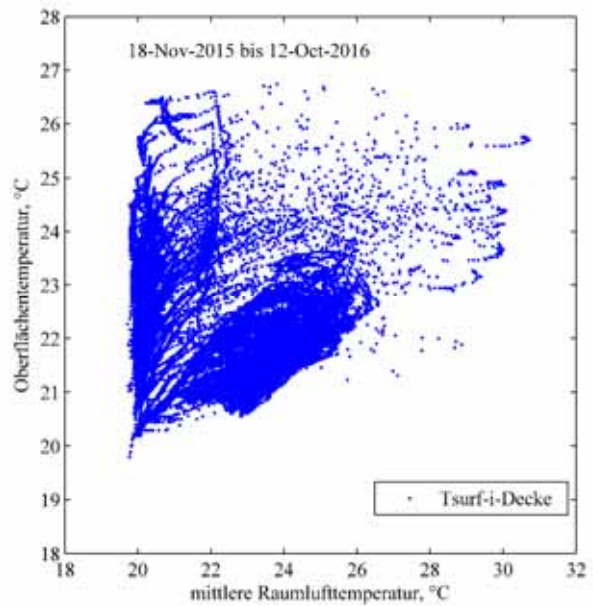
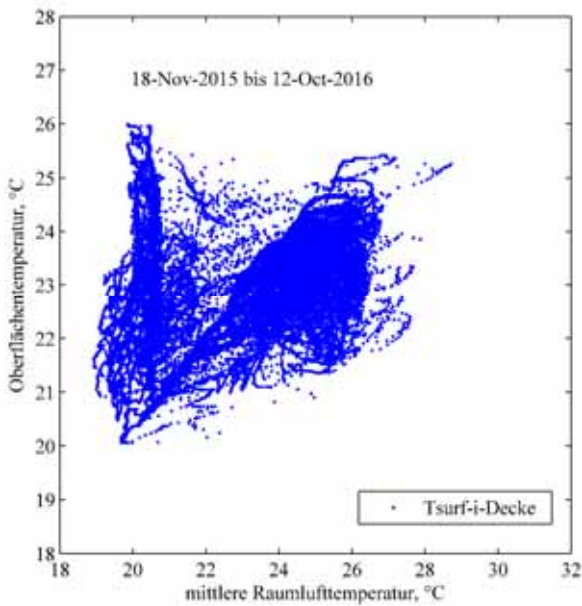


Die mittlere Raumlufttemperatur ist um $0,5 \text{ K}$ höher als die operative Temperatur

Decken- Oberflächentemperaturen

Modellprädiktiver Regler (+S02)

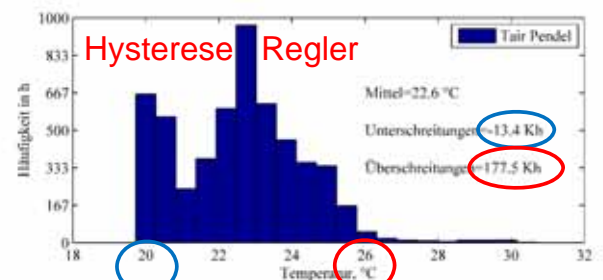
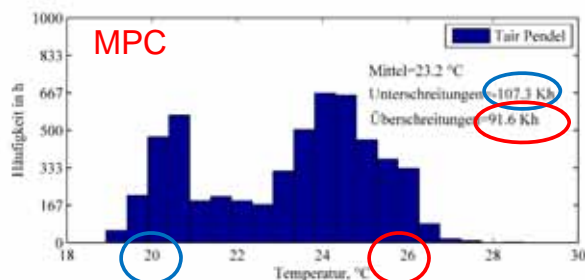
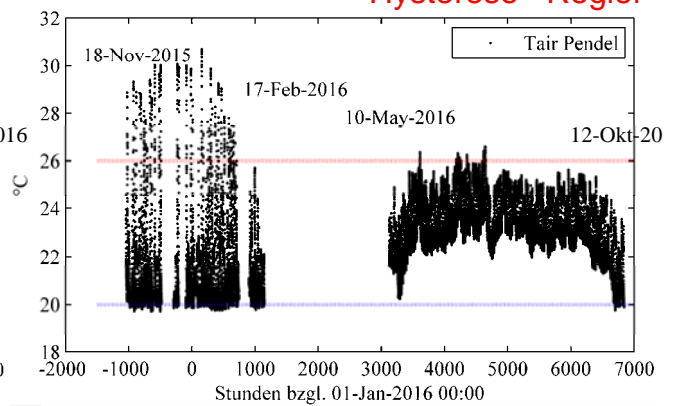
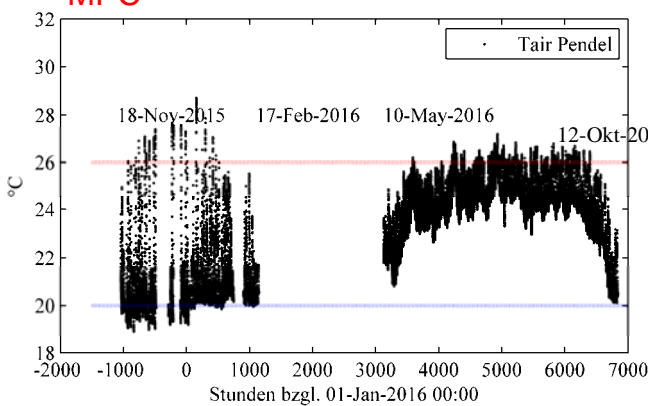
Hysterese Regler (+S03)

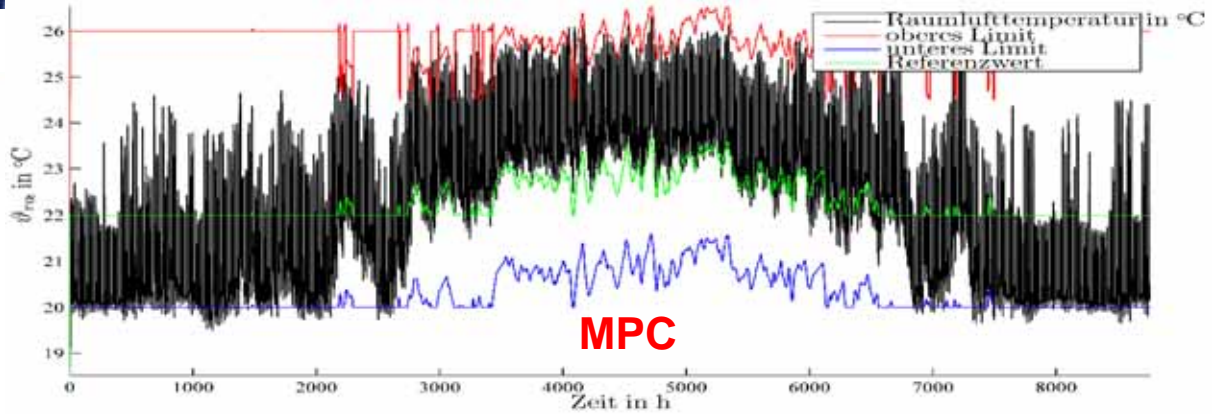


Analyse des Komforts

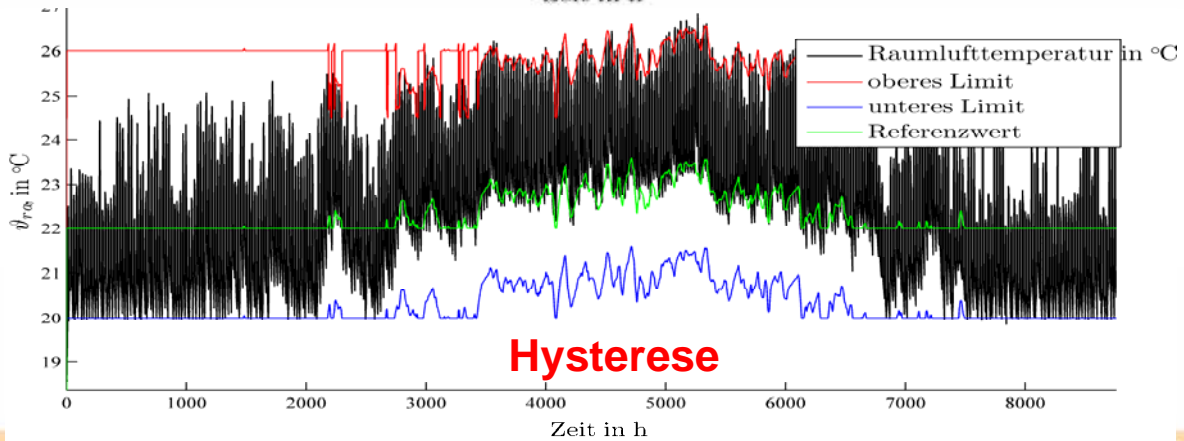
MPC

Hysterese Regler





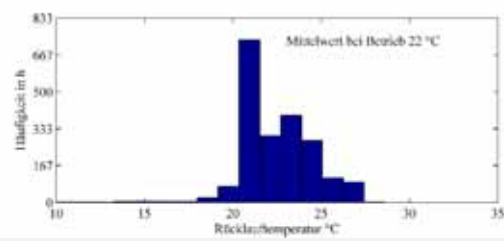
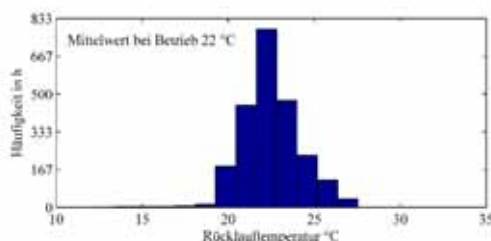
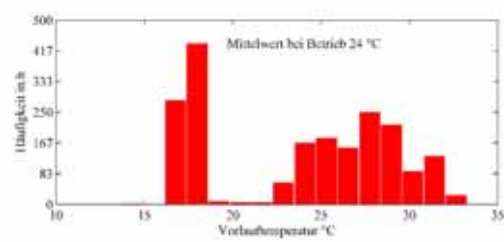
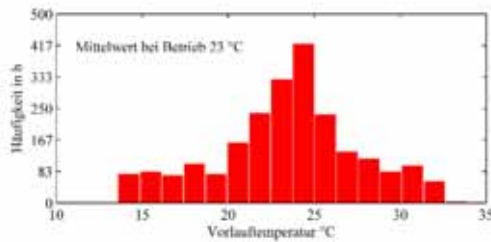
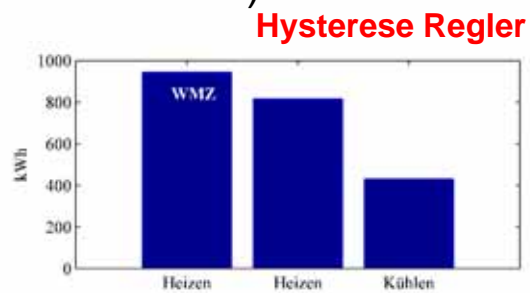
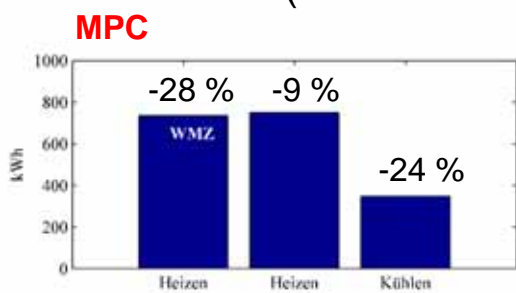
MPC



Hysteresese

Simulationsergebnisse

Analyse der eingebrachten Energiemengen (11.Okt 2015 – 11.Okt 2016)



Zusammenfassung

- Projekt MPC-Boxes: Vergleich einer konventionellen gegen eine Modellprädiktive Regelung
- Test-Boxen mit Bauteilaktivierung zum Heizen und Kühlen
- Thermophysikalische Gleichheit ist gegeben
- Implementierung der MPC mit MATLAB (YALMIP)
- Vergleichsbetrieb seit Sommer 2015
- Messdaten über ein Jahr, ca. 3 Monate Ausfall im Frühjahr

Überblick zu den Ergebnissen

- Decken-Oberflächentemperatur für MPC tendenziell näher an der Raumlufttemperatur
- Sehr hohe Übertemperaturen (4.5 K) im Heizbetrieb bei Hysterese Regler
- **Komfortverletzungen** in Kelvinstunden für MPC und Hysterese Regler **unter 200 Kh**
- Um 1 K geringere Vorlauftemperaturen für MPC
- Energie Einsparung mit MPC-Heizen 9 % oder 28 %
- Energie Einsparung mit MPC-Kühlen 24 %
- Monovalenter Betrieb bei guter Verschattungsregelung (JA)

Ausblick

- Auswertung weiterer Details
 - Einfluss der Verschattungsregelung
 - T-Vorlauf/Rücklauf getrennt für Heizen/Kühlen
- Berechnung der Schwankungsbreiten für die Energieeinsparungen
- Bericht Ende Jänner 2017

Danksagung

Dieses Projekt wird im Rahmen des F-Programms „Haus der Zukunft Plus“ durchgeführt, gefördert aus Mitteln des BM für Verkehr, Innovation und Technologie. (FFG Projektnummer 840675)

Forschungspartner:



Sponsoren aus der Wirtschaft:

