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

Martin Felix Pichler martin.pichler@tugraz.at





Haus der Zukunft PLUS

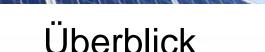












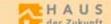
- Einleitung
- Grundprinzip Modellprädiktive Regelung
- Forschungsprojekt MPC-Boxes
- Ergebnisse aus der realen Messung











Einleitung

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



Interessant mit steigender therm. Trägheit





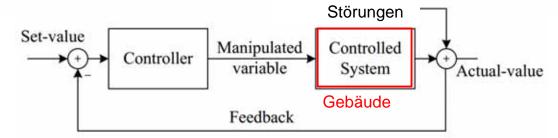


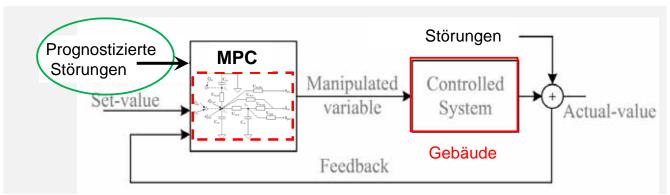


HAUS



Standard versus Modell Prädiktive Regelung (MPC)





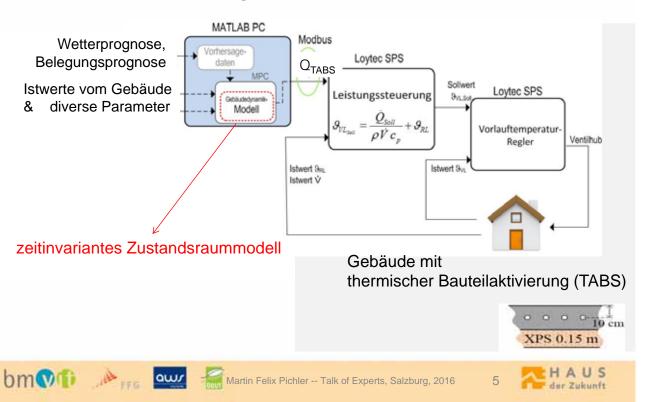






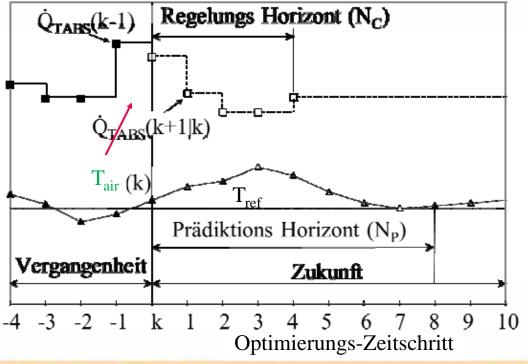


Gesamter Regelkreis Bsp. Gebäude



Haus der Zukunft PLUS

Grundprinzip Prädiktive Regelung











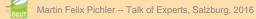
Was kann eine (Modell) prädiktive Regelung leisten

- 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.













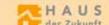
Anwendung

Forschungsprojekt MPC-Boxes









Projektziele und Ergebnisse Konzept für eine ausreichend Sensorik zur Analyse u. Komfortmessung Test-Boxen in realer herkömmlichen Regelunge Umgebung Test-Box von bauphysikalischen Zwei exakt gleiche Systeme mit identen Umweltbedingungen Parametern zum einfachen Modell Zwei Einsatz von zusätzliche Sensorik zur Test-Boxen mit aktiven Wettervorhersage Modellassimilation Bauteilen, Sensorik und Wetterstation zur Bestimmung der Wetterstation nweltbedingungen und zur Optimierung der Wetterprognose Modellidentifikation und Analyse der Modellgüte Modelle untersschiedliche Heiz- und Kühlfall unterschiedliche Regleransätze untersucher Untersuchung der Regler Design und Simulationen mit idealen Modellassimilation bei Wettervorhersagen Nutzung unterschiedlicher realer Messwerte Simulationen Simulation mit real Vorhersagedaten und real eingetretenen Bedingunger Zunahme der Modellkomplexität allgemeine Transferierbarkeit der Erkenntnisse und Ergebnisse ökon. Kostenimplikationen für Vergleichende graduell erhöhte Komplexität für die Test-Boxen Messungen in realer Interpretation der zukünftig erforderliche Umgebung Ergebnisse, Ableitung interne Last, Verschattung, etc Forschungsarbeiten von Erkenntnissen Anwendbarkeit in einer realen Beurteilung der Robustheit ggf. erforderliche Veränderungen bei hydraulischen Systemen Umgebung optimale Methoden zur Standortoptimierter Wettervorhersage HAUS bm VIII AFF awr Martin Felix Pichler -- Talk of Experts, Salzburg, 2016



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











der Zukunft

Überblick -- Hauptteil

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









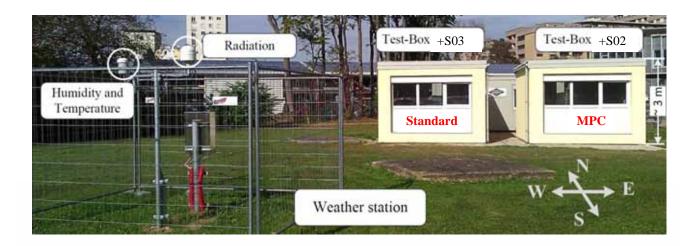




Haus der Zukunft PLUS

MPC-Boxes Experimenteller Aufbau

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













Messstellen

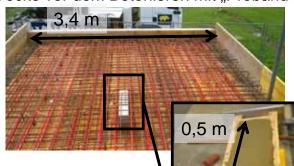
Oberflächentemperaturmessung



Messstelle mit Pt1000 Sensor

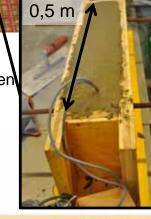


Decke vor dem Betonieren mit "Proband"



"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











Martin Felix Pichler -- Talk of Experts, Salzburg, 2016







Haus der Zukunft PLUS

Gleicheit 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.



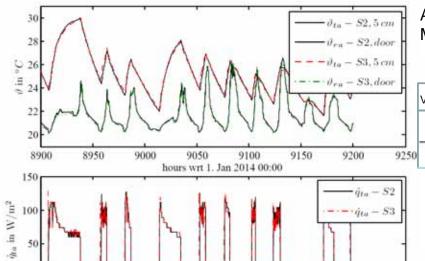








Thermophysikalischer Vergleich



Auswertung eines Messintervalls von 1000 h

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

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

$$\begin{array}{l} \vartheta_{ta} \ = \ T_{TABS} \\ \vartheta_{ra} \ = \ T_{air} \end{array}$$



8950

8900



9000



9050

hours wrt 1. Jan 2014 00:00

9100

9150



9200

17





9250

MPC-Betrieb in Aller Kürze

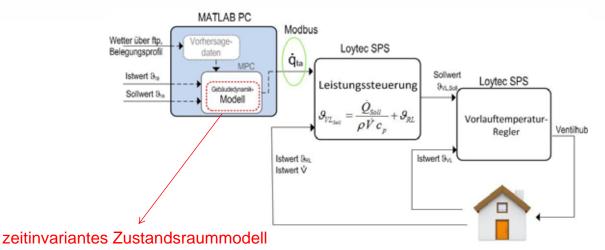
- Wettervorhersage wird jede Stunde aktualisiert
- Modellprädiktiver Regler (MPC) mit Matlab umgesetzt
- MPC-Betrieb läuft seit Sommer 2015







Übersicht gesamter Regelkreis









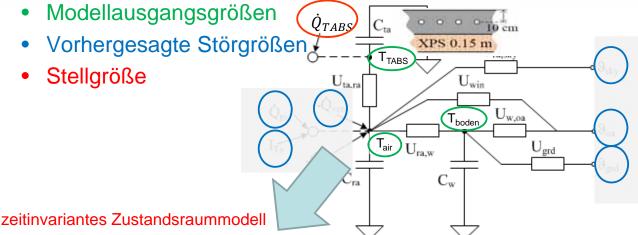






Haus der Zukunft PLUS

Reglermodell – RC Formalismus



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







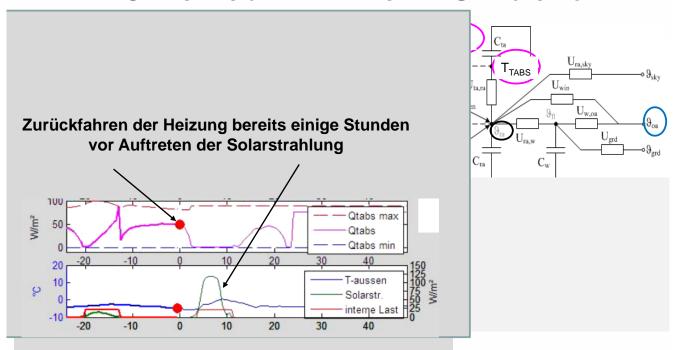


Wiedergabe-Güte eines identifizierten Modells

Identifikationsdaten Validierungsdaten P 24 Bauteiltemperatur (Decke) 22 4740 640 Raumlufttemperatur 22 4700 4740 4760 θ_{ft} 24.5 Bauteiltemperatur (Boden) g 24 21 4740 4760 Strichpunktiert Modell, durchgezogen Messwert HAUS bm Martin Felix Pichler -- Talk of Experts, Salzburg, 2016

Haus der Zukunft PLUS

MPC-Betrieb im Winter -- Simulation



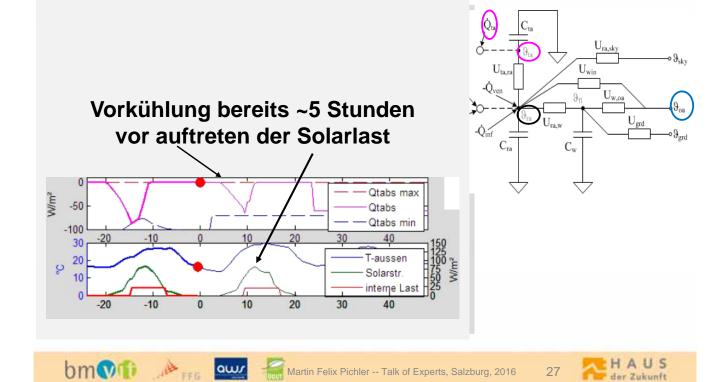






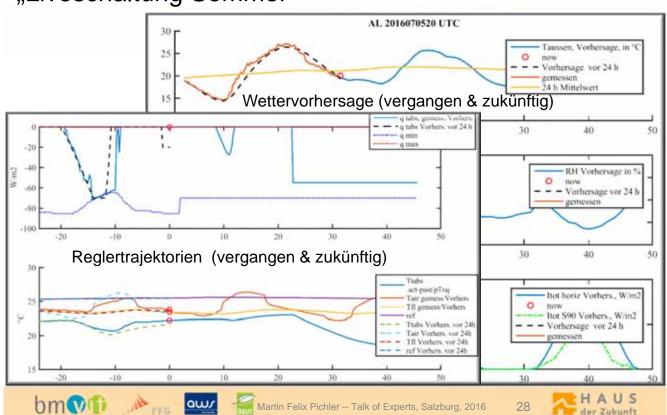
der Zukunft

MPC-Betrieb im Sommer -- Simulation



Haus der Zukunft PLUS

"Liveschaltung Sommer"



Randbedingungen

- Raumlufttemperatur (Tair): Mittel zweier Messpositionen im Raum
- Interne Lasten 22.4 W/m² von 9:00 bis 17:00
- Standardregelung Hysterese Regler:

Heizen: EIN: Tair < 20°C: AUS: Tair > 22 °C EIN: Tair > 24°C: AUS: Tair < 22 °C – Kühlen:

- MPC Temperatur Limits:
 - Minimale Tair 20 °C
 - Maximale Tair 26 °C





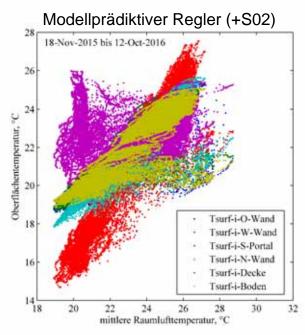


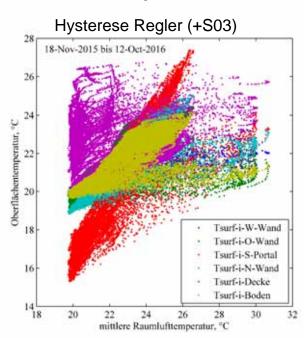




Haus der Zukunft PLUS

Auswertung der Oberflächentemperaturen





Die mittlere Raumlufttemperatur ist um 0,5 K höher als die operative Temperatur



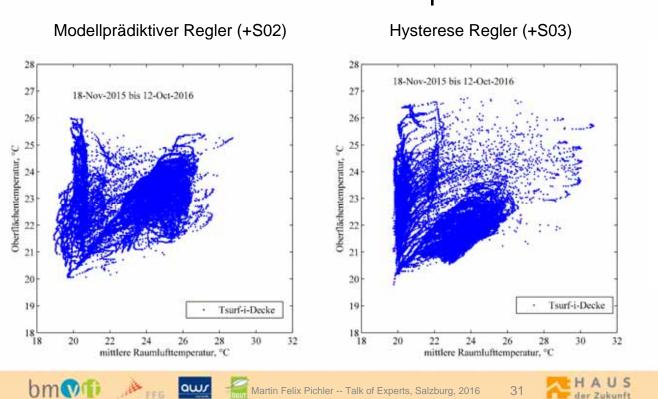




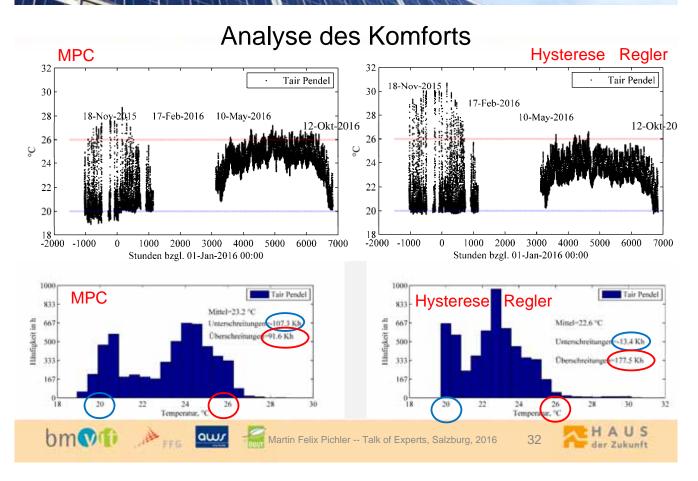


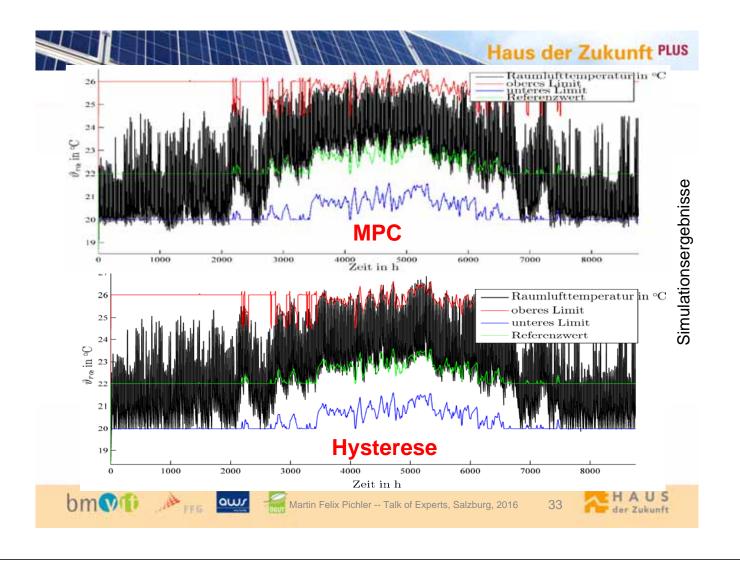


Decken- Oberflächentemperaturen



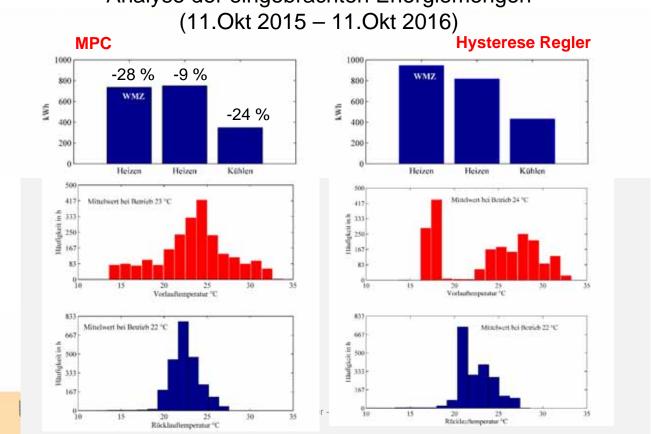
Haus der Zukunft PLUS





Haus der Zukunft PLUS

Analyse der eingebrachten Energiemengen



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









Martin Felix Pichler -- Talk of Experts, Salzburg,

35





Uberblick 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













Haus der Zukunft PLUS

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:

















