



Cooperative fuzzy model predictive control of a multi-zone office building



INSTITUT FÜR
MECHANIK UND
MECHATRONIK
Mechanics & Mechatronics

evon

evolution in automation

Michaela Killian

10. Juni 2016



Motivation



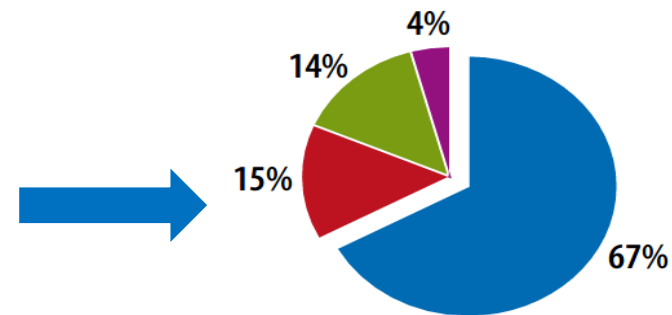
Gebäudesektor verbraucht Großteil der Gesamtenergie eines Landes:

Verbrauch in...

- ... den USA 49 %
- ... Europa 40 %
- ... den VAE 70 %



<http://www.rockwool.com/>



- heating
- lighting and electric devices
- warm water
- cooking

<http://www.ea-etics.eu>

Enerdata 2006

Herausforderungen & Ziele



Optimierungsziele in einem Gebäude:

- Energieverbrauch (Heiz/Kühlleistung) minimieren
- NutzerInnen-Komfort maximieren
- Energieverbrauch kostenminimal (€)
 - Nutzung alternativer Energiequellen (Geothermie, Free Cooling)

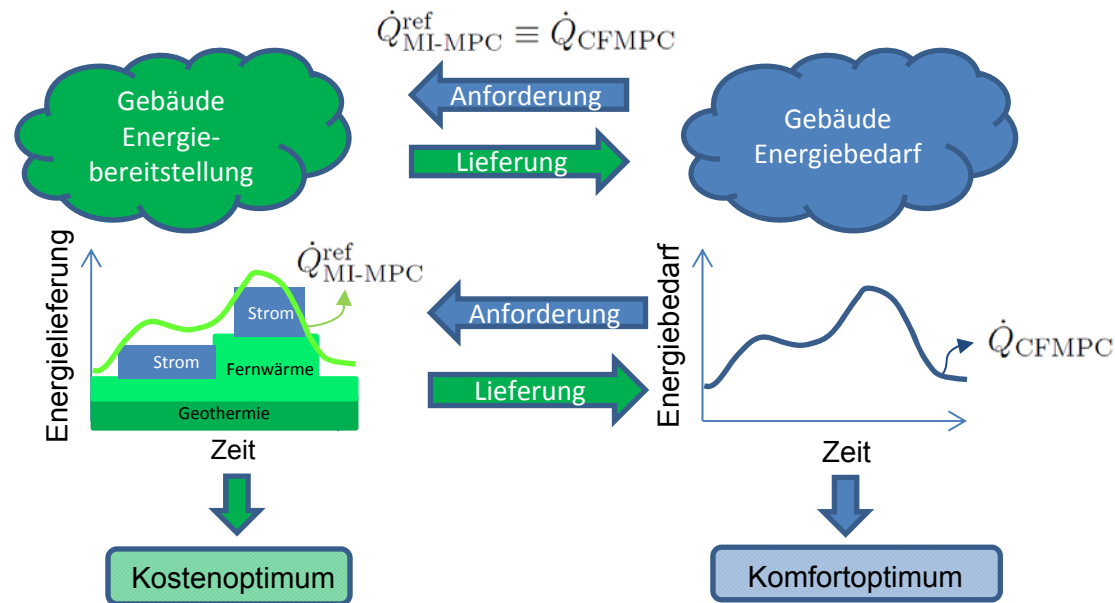


Abb. 1: Gegenüberstellung der kontroversen Optimierungsziele.

Herausforderungen & Ziele



Optimierungsziele in einem Gebäude:

- Energieverbrauch (Heiz/Kühlleistung) minimieren
- NutzerInnen-Komfort maximieren
- Energieverbrauch kostenminimal (€)
 - Nutzung alternativer Energiequellen (Geothermie, Free Cooling)

Wissenschaftliche Herausforderungen:

- Nichtlineares dynamisches komplexes MIMO-System
- Redundante Stellgrößen mit großen Zeitkonstanten
- Kontroverse Optimierungsziele

Ziele des Industriepartners:

- Entwicklung einer flexiblen Toolchain
- Rasche Inbetriebnahme muss möglich sein
- Modularer Aufbau des Konzeptes



M. Killian, B. Mayer, M. Kozek.
Hierarchical Fuzzy MPC concept for building heating control.
In Proc. of 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, 2014.
DOI: [10.3182/20140824-6-ZA-1003.00772](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00772)

Entwicklung eines **flexiblen Algorithmus** für max. Komfort bei min. Heiz/Kühlleistung mit:
Störprognosen
technischen und **thermischen** Beschränkungen

$$\text{Sollwertvorgabe: } \dot{Q}_{\text{CFMPC}} = \dot{Q}_{\text{MI-MPC}}^{\text{ref}}$$

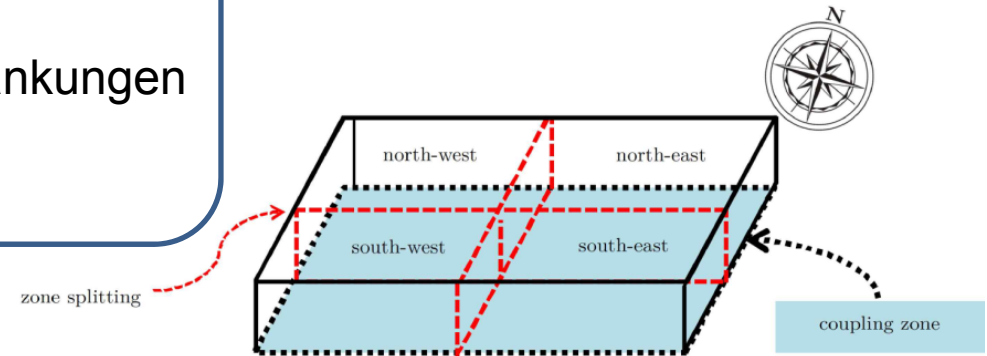


Abb. 2: Einteilung der Gebäudezonen (Himmelsrichtungen & Versorgungsstränge) und Illustration der Kopplungszone.

Annahmen im Gebäude:

- Gebäude in Zonen geteilt (Strahlung & Versorgungsstränge)
- Regelung auf mittlere Zonen-Raumtemperaturen
- Kopplungszonen über ganze Ebene (Betonteilaktivierung)

Lösungskonzept:

- **Kooperatives** Regelungskonzept zwischen verschiedenen nicht-linearen Zonen-MPCs und einem global linearen Kopplungs-MPC

➔ **CFMPC** (cooperative Fuzzy model predictive control)

Gebäude ist nichtlineares dynamisches System:
schnelle & langsame Dynamik, innere Kopplungen

Herausforderungen:

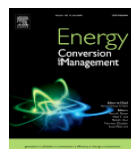
- Dynamisches Modell niedriger Ordnung
- Messdaten als Grundlage
- Anwendbarkeit muss universell sein

Eigene Entwicklung:

- Datengetriebenes nichtlineares dynamisches Modell für Mehrzonen-Gebäude
(Zonen, Input/Output, Prädiktionen)



M. Killian, B. Mayer, M. Kozek:
"Effective Fuzzy Black-Box Modeling for Building Heating Dynamics";
Energy and Buildings, Volume **96** (2015), 175 - 186.
DOI: [10.1016/j.enbuild.2015.02.057](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.057)



B. Mayer, M. Killian, M. Kozek:
"Management of hybrid energy supply systems in buildings using mixed-integer model predictive control";
Energy Conversion and Management, Volume **98** (2015), 470 - 483.
DOI: [10.1016/j.enconman.2015.02.076](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.076)

Innovativer Modellierungsansatz:

- datengetriebenes Black-Box Modell → lokal lineares Modellnetzwerk (LLMN)

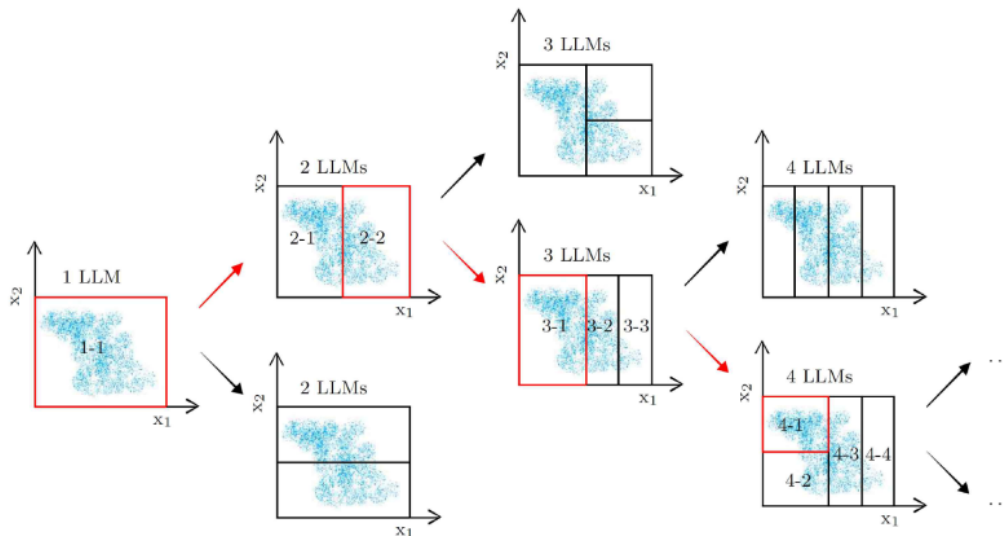
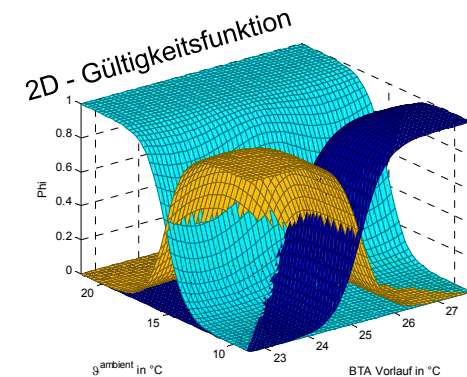


Abb. 3: Lokal lineares Modellnetzwerk – Idee des Algorithmus.

Partitionierungsraum (x_1, x_2):
größte Nichtlinearität
(Expertenwissen/Datenanalyse)

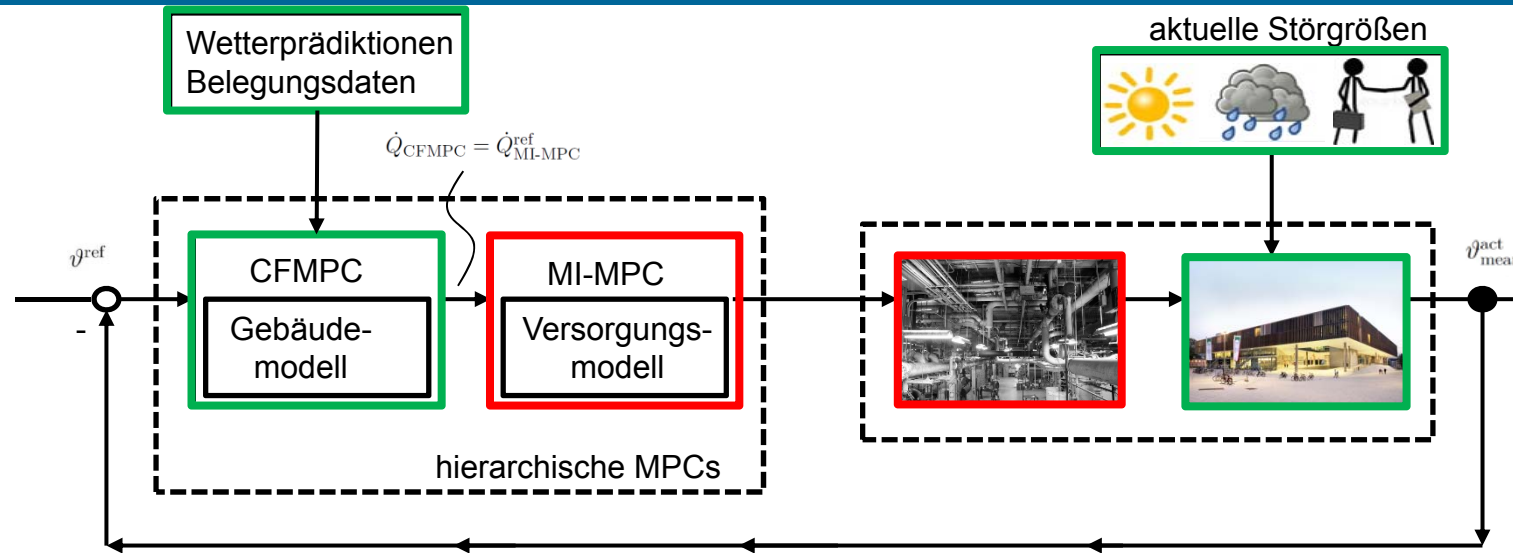
Teilungen achsenorthogonal

Anzahl der LLMs ist fixiert



M. Killian, S. Grosswindhager, M. Kozek, B. Mayer:
"Pre-processing of Partition Data for Enhancement of LOLIMOT";
Proc. of the 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Cardiff, Wales, 2013.
DOI: [10.1109/EUROSIM.2013.56](https://doi.org/10.1109/EUROSIM.2013.56)

Hierarchisches Reglerkonzept



Entkoppelte Optimierungsziele unter bestimmten **Nebenbedingungen**:

Das **Gebäude** selbst inklusive aller **Störungen**

- Regelung auf NutzerInnen-Komfort (Temperatur-Regelung)

Die **Versorgungsebene** (technische Ebene)

- Regelung auf monetäre Energiekosten (Fernwärme vs. Wärmepumpe etc.).



B. Mayer, M. Killian, M. Kozek:
"Cooperative and Hierarchical Fuzzy MPC for Building Heating Control";
Proc. of the 2014 IEEE World Congress on Computational Intelligence
(International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE), IEEE Xplore, Beijing, China, 2014.
DOI: [10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891573](https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891573)

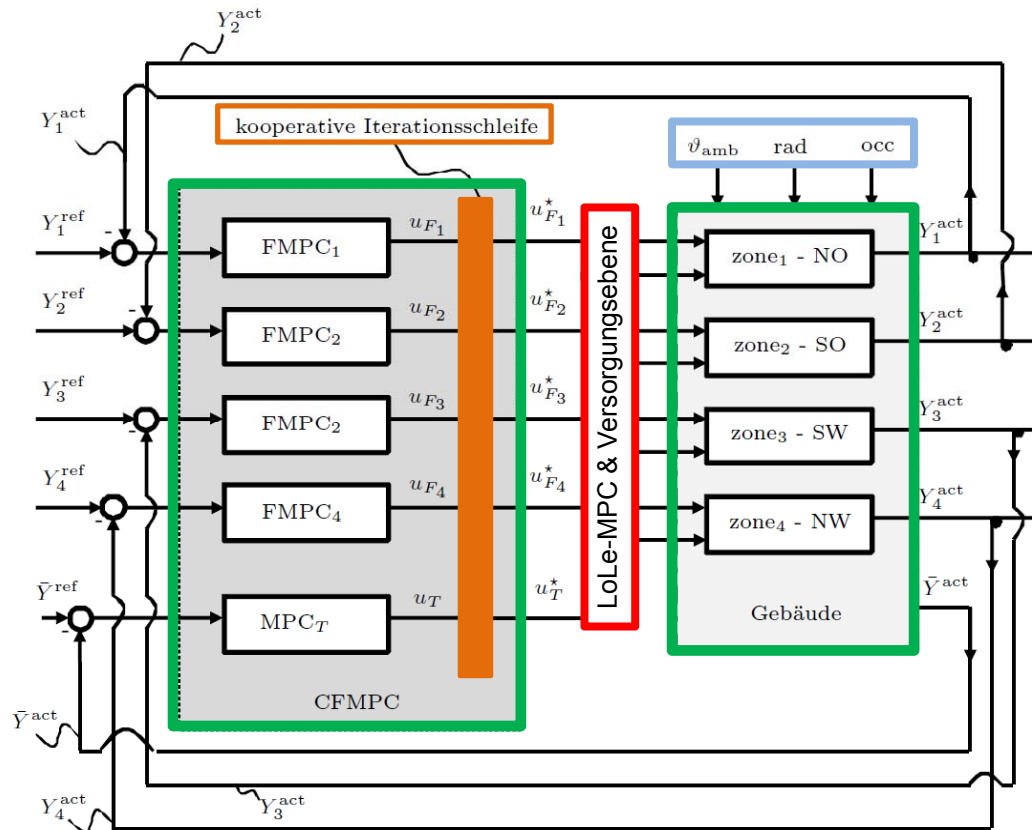


Abb.4 : CFMPC Konzept für das spezifische Demonstrationsgebäude.



M. Killian, B. Mayer, A. Schirrer, M. Kozek:
 "Cooperative Fuzzy Model Predictive Control";
 IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Volume **24** (2016), 471-482.
 DOI: [10.1109/TFUZZ.2015.2463674](https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2015.2463674)



M. Killian, B. Mayer, A. Schirrer, M. Kozek:
 "Verteilte kooperative modellprädiktive Temperaturregelung für komplexe Gebäude";
 e & i Elektronik und Informationstechnik (invited), Springer Verlag, Volume **132** (2015), 474 - 480.
 DOI: [10.1007/s00502-015-0374-6](https://doi.org/10.1007/s00502-015-0374-6)

Heiz-/Kühlinput in das Gebäude wird kooperativ (iterative Schleife) optimiert:



Für das kooperative **Iterations-Update** gilt:

$$u_{F_i}^q = h_{F_i}^q(\cdot | u_T^q),$$

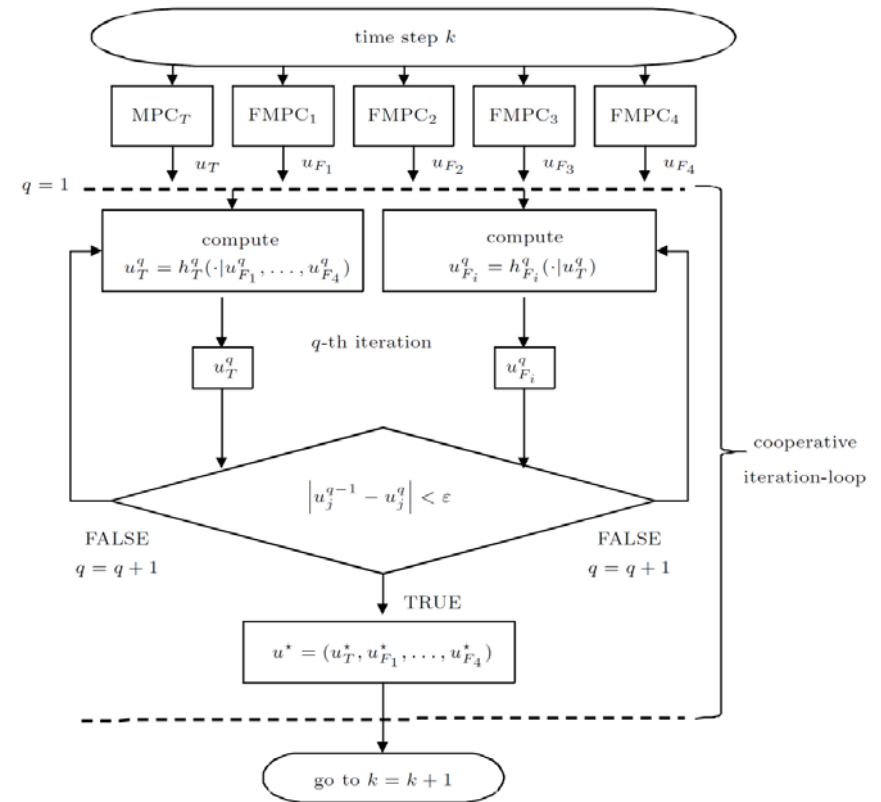
$$u_T^q = h_T^q(\cdot | u_{F_1}^q, \dots, u_{F_4}^q)$$

$$u^{q+1} = (u_{F_i}^{q+1}, u_T^{q+1})$$

$$= \Psi_{F_i} \cdot (u_{F_i}^*(u_T^q), u_T^q) + \Psi_T \cdot (u_{F_i}^q, u_T^*(u_{F_i}^q))$$

$$= \Psi_{F_i} \cdot \left(\sum_{l \in \mathbb{L}} \Phi_{F_i, l} u_{F_i, l}^*(u_T^q), u_T^q \right) + \Psi_T \cdot \left(\sum_{l \in \mathbb{L}} \Phi_{F_i, l} u_{F_i, l}^q, u_T^* \left(\sum_{l \in \mathbb{L}} \Phi_{F_i, l} u_{F_i, l}^q \right) \right)$$

$$\sum_{j \in \{T, F_i\}} \Psi_j = 1 \quad \forall \Psi_j > 0, i \in \mathbb{F}.$$





<http://www.akflebanon.com/>

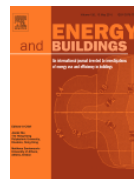
SMARTmsr



 UNIVERSITÄT
SALZBURG

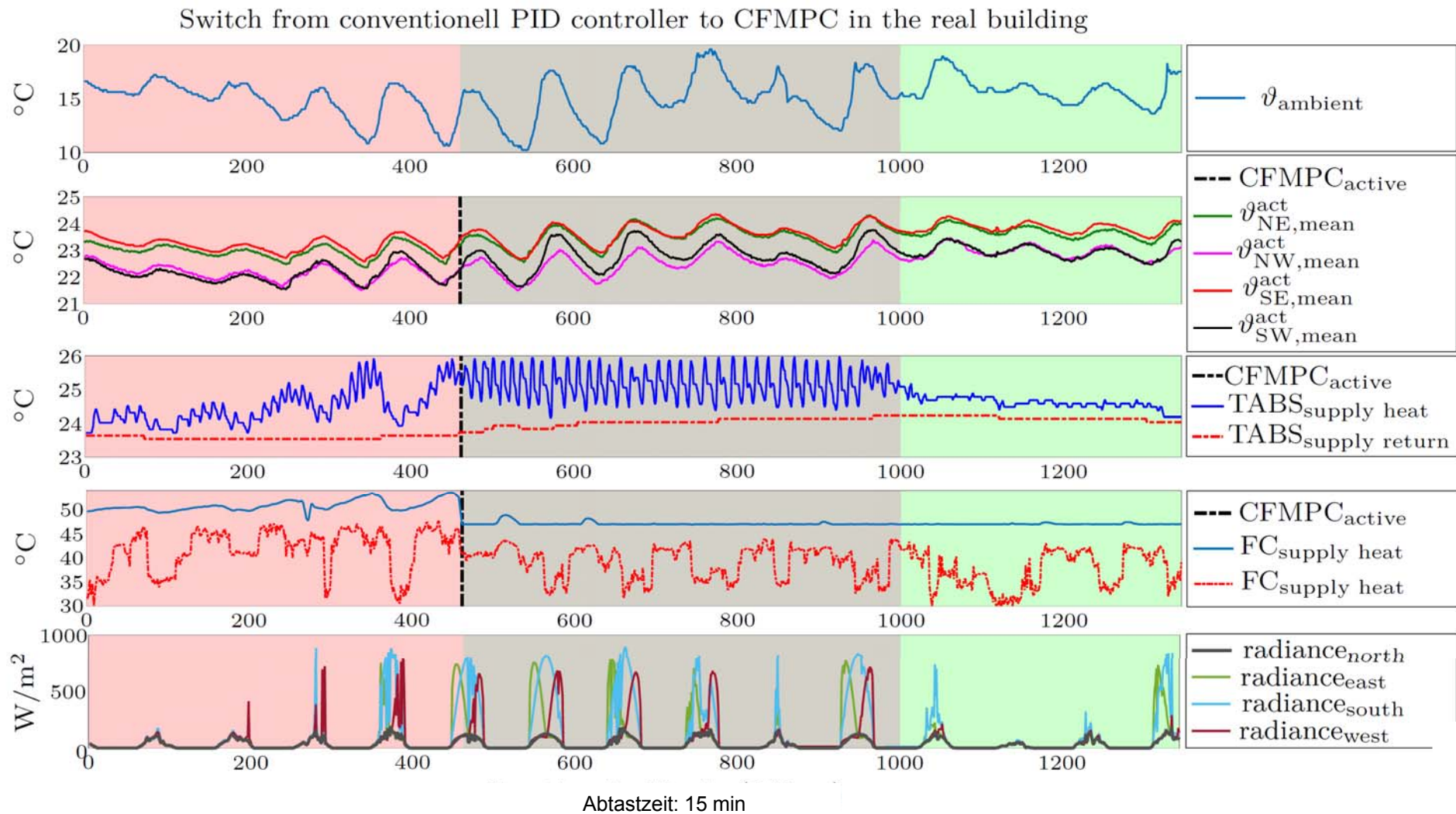
evon

- Gebäudeerrichtung 2010 mit ca. 28.000m²
- Energiequellen: Geothermie, Fernwärme, Strom (Kältemaschine, Wärmepumpe), Free Cooling
- Geteilt in 4 nichtlineare Zonen & 1 lineare Zone
 - Betonteilaktivierung (Zeitkonstante: 48 h)
 - Unterflurkonvektoren (Zeitkonstante: 4 h)



M. Killian, B. Mayer, M. Kozek:
"Cooperative Fuzzy Model Predictive Control for Heating and Cooling of Buildings";
Energy and Buildings, **112** (2016), 130 - 140.
DOI: [10.1016/j.enbuild.2015.12.017](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.017)

Ergebnisse der Implementierung

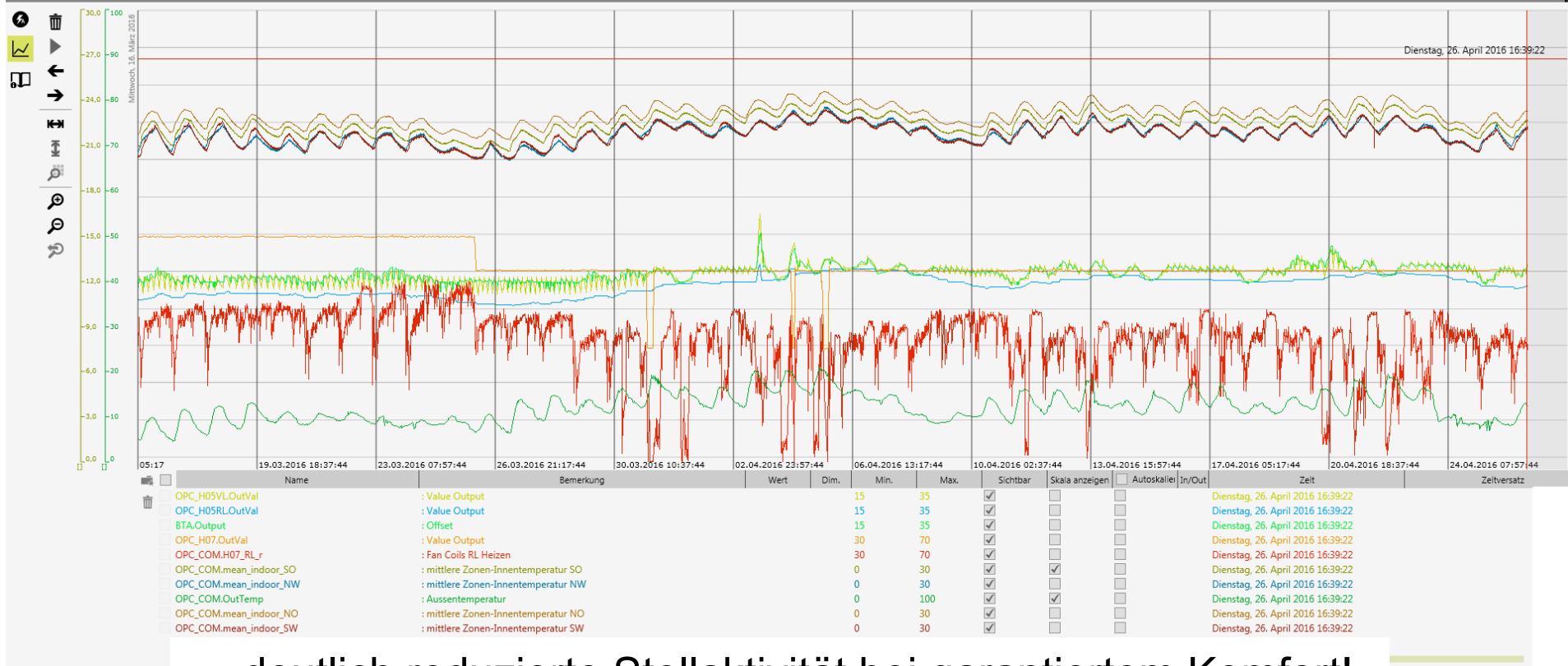
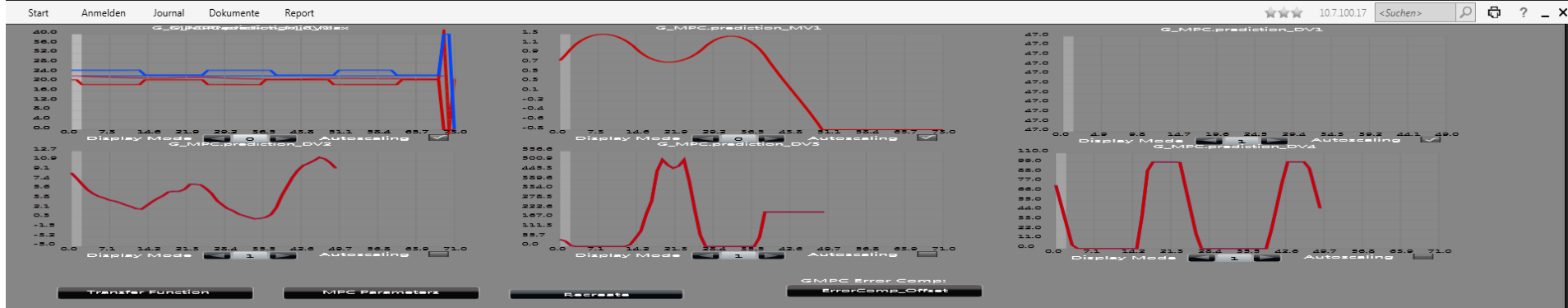


konventionell

CFMPC

→ deutlich reduzierte Stelaktivität bei garantiertem Komfort!

Ergebnisse der Implementierung



→ deutlich reduzierte Stellaktivität bei garantiertem Komfort!

Erster Vergleich – vorher/nachher



Bei unveränderter Komfortqualität ergibt sich:

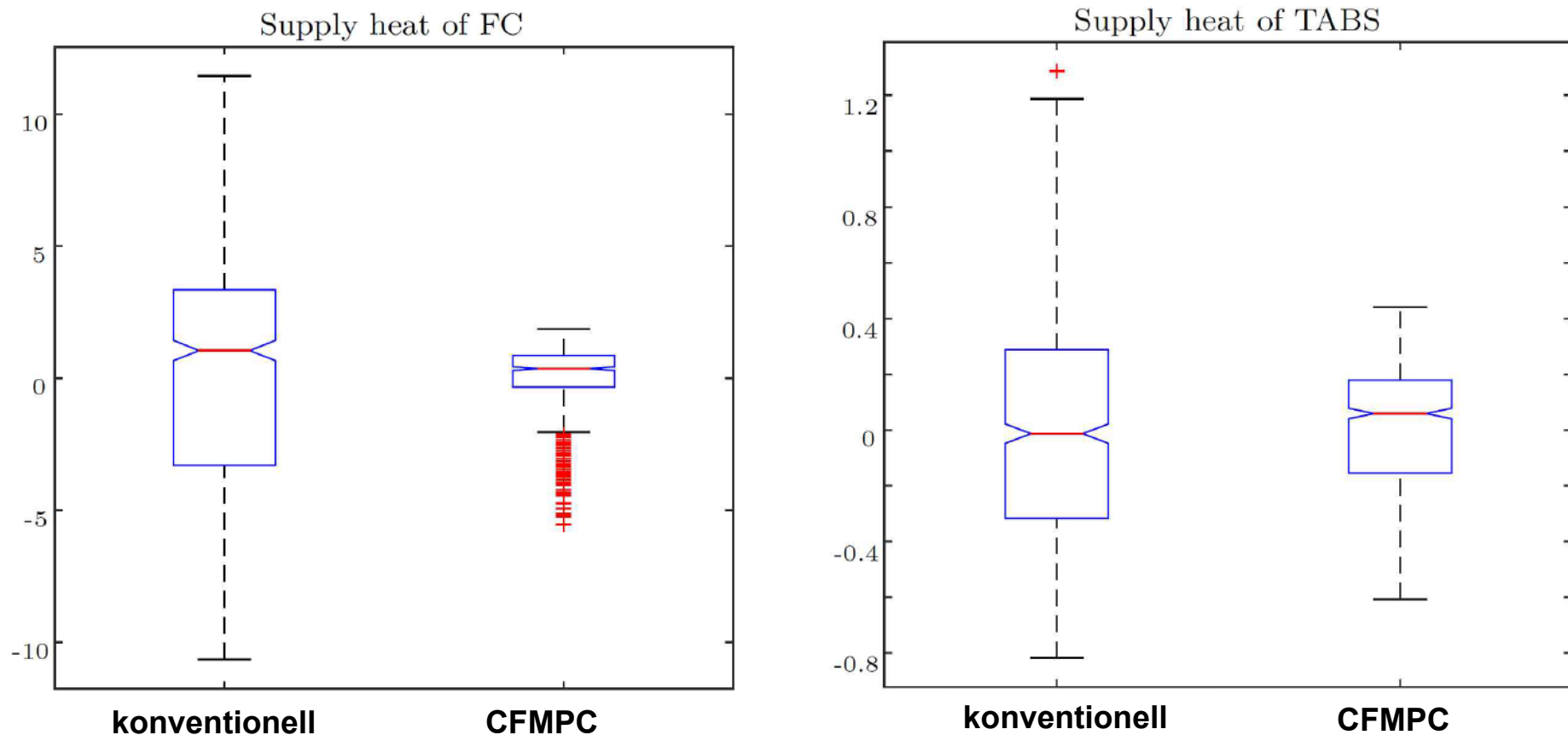


Abb. 5: Vergleich Vorlauftemperaturen (mittelwertfrei) der beiden Stellgrößen (FC, TABS) vor und nach der Implementierung dargestellt in Boxplots.

Originalität

Entwicklung eines flexiblen/effektiven Fuzzy black-box Modells

Entwicklung des kooperativen Fuzzy MPCs (CFMPC):

- Theorie neu entwickelt
- Stabilität bewiesen
- Konvergenz der Iterationsschleife bewiesen
- allgemein gültig (auch instabile bzw. schwingungsfähige Systeme)

Innovation

Nutzen für Industriepartner:

- zusätzliche Flexibilität für Gebäuderegulung (Hinzufügen von neuen Gebäudezonen, Hierarchie)
- rasche Implementierung (Toolchain)
- Wettbewerbsvorteil: CFMPC ist Alleinstellungsmerkmal



Nachfolgeprojekte

- intelliEE-Home (mit evon), ab 2021: $-150.000t \text{ CO}_{2,eq}/\text{GWh}$
- H2020 demand response
- Neuer Markt: Klimaregelung von Flughäfen (evon)



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

