

# Nachhaltige (Energie-) Technologien

## Status und aktuelle Entwicklungen

- 1 Abschluss Projekt: Energiekonzept zur Abwärmenutzung
- 2 Energetische Optimierung des DESY-Gebäudebetriebs
  - (1) Projekt: SOMA-HVAC
  - (2) Projekt: MARGE

HAW  
Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau  
und Produktion

HAW  
Fakultät Life Sciences

DESY  
Maschine-Kraft-Kühlung  
Klimatisierung und Wärmeversorgung -MKK 3-

DESY  
Stabsstelle Nachhaltigkeit D6

# 1. Energiekonzept zur Abwärmennutzung bei DESY

Projektlaufzeit 11/2020 – 02/2022

Abschlussarbeiten in Kooperation zwischen Prof. Dr.-Ing. Sankol (HAW) mit MKK und D6 (DESY)

- Konzeptionelle Untersuchung zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme in einem Nahwärmenetz
- Untersuchung zur direkten Nutzung von Niedertemperaturabwärme im Neubaubereich durch Anwendung der Lüftungsheizung
- Heizlastberechnung für die Temperaturabsenkung im Heizkreis eines Bestandsgebäudes
- Exemplarische Analyse von Unterstationen eines Wärmenetzes und Überprüfung auf Machbarkeit zur Verringerung der Systemtemperaturen
- Untersuchung zum Einsatz verschiedener Vorlauftemperaturen im Nahwärmenetz
- Simulation und Berechnung der Luftkonditionierung im Teilchenbeschleuniger HERA beim DESY und technische Umsetzung
- Untersuchungen zum Kaltwassernetz



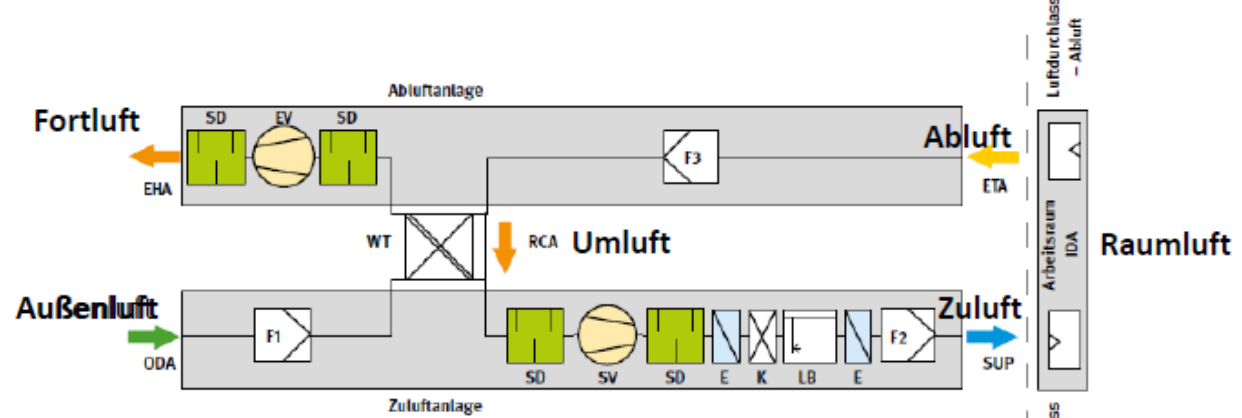
**DESY Hamburg<sup>1</sup>:**

Wärmebedarf:	23,13 GWh
WRG Kryogenik:	9,40 GWh
Fernwärmebezug:	15,73 GWh

**Abwärmequellen<sup>2</sup>:**

AMTF:	3,86 GWh	(22°C)
DESY 16d:	8,74 GWh	(30°C)
Flash PH1:	3,77 GWh	(30°C)
Flash PH2:	5,44 GWh	(30°C)
Hera West:	19,6 GWh	(29°C)
Petra Nord Ost:	26,8 GWh	(30-38°C)
Petra Süd:	16,3 GWh	(35°C)
XFEL-XHM:	44,9 GWh	(34-38°C)

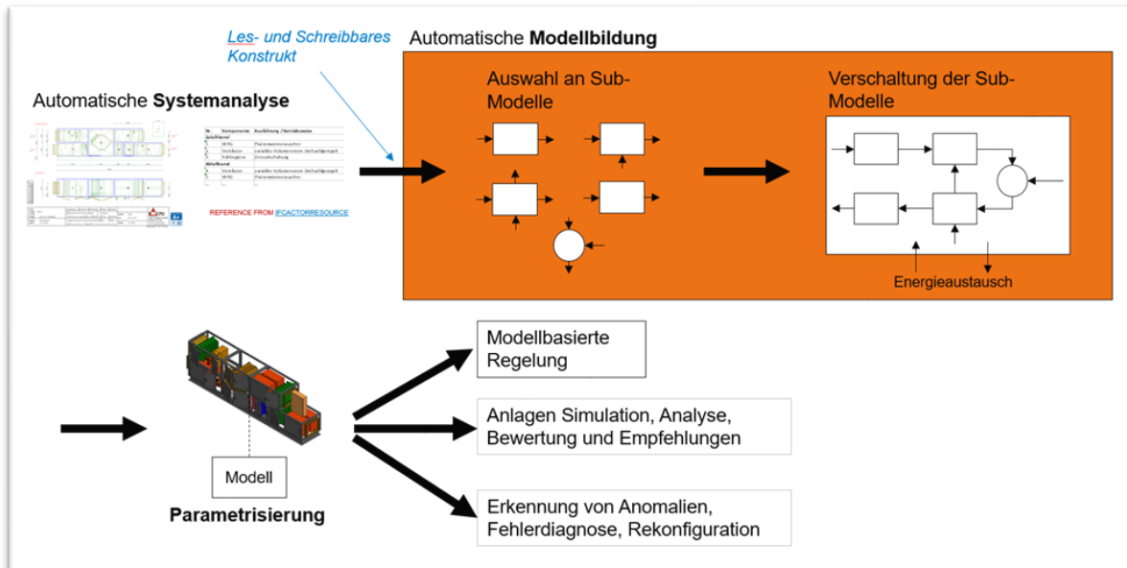
<sup>1</sup>: Daten aus dem Jahr 2019 (Zertifizierung: TU Dresden).



# Projekt: SOMA-HVAC

## Scaleable Optimization with Multilinear Automation for HVAC-Systems

- HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning (Heizungs- und Raumluftechnische (RLT) Anlagen)
- Framework für intelligente skalierbare Lösungen zur Konzept-, Planungs- und Betriebsoptimierung der HVAC-Anlagen unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten
- Warum? Mit Petra IV über 2000 solcher Anlagen auf unserem Campus



- Basierend auf einer allgemeingültigen komponentenbasierten Modellierung
- Möglich durch die geschlossene implizite multilineare Modellklasse

Veröffentlichungen:

- Lichtenberg et al, *Implicit multilinear modeling, automatisierungstechnik* 2022
- \*Paper-in-progress / Arbeitstitel (IFAC WC 2023): *Implicit multilinear models for air conditioning systems*

# Möglichkeiten

## Aufbauende Möglichkeiten und Anwendungen der Modelle

- **Energetisch und ökonomisch optimierende Plug-and-Play-Regelung von RLT-Anlagen**  
(z.B. mit economic model-predictive control EMPC-Algorithmen)
- **Rechnergestützte Analyse bestehender und zu planender Systeme**  
(e.g. energetische Inspektion, Anlagenempfehlung, nutzungsorientierte KPIs)
- **Erkennung von Anomalien, Fehlerdiagnose, Rekonfiguration**  
(bei Anlagenverschleiß oder defekten Komponenten wie defekter Kühlwasserpumpe)
- **BIM4HVAC: Modellbildung aus Informationen der BIM-Modelle**
- **Modellerweiterung und Kopplung mit weiteren Systemen**  
(wie z.B. Umluft-Kühlgeräte, statische Heizkörper, redundante Systeme etc.)
- **Hierarchische Modellierung des kompletten Standorts**  
(für höhere Management Entscheidungen z.B. Wartungsoptimierung aller Anlagen, Optimierung durch Ausnutzen von Redundanzen)
- **Sektorkopplung: Demand-Side-Response**  
(bspw. durch das Ausnutzen von Sollwert-Toleranzen, Skalierbar durch übergeordnetes Campus-Modell)
- **Implementierung lernender Algorithmen zur Optimierung von Sollwerten**  
(z.B. Anpassung an das Nutzerverhalten)
- **Gemeinsamer Methoden- und Kompetenzpool**  
(mit anderen model-based control Experten, z.B. MSK DESY)

# Forschungsprojekt: MARGE

## Multilineare Automation zur Reduktion gewerblicher Energienutzung

### Ziele:

1. Herstellerunabhängiger Koordinationsregler
  - optimiert dezentrale Erzeugung und Nutzung
  - innerhalb eines heterogenen Wärmeverbunds
2. Regelungskonzept
  - basiert auf multilinearen Modellen
  - die datenbasiert erzeugt werden
3. Implementierung
  - mit OpenSource Datenbank JeVis
  - Konfiguration ohne spezielle Programmierkenntnisse
4. Tests
  - an Demonstrationsgebäuden bei DESY
  - Experimentierhallen UND Büros

Mittelgeber: BMBF

Programm: KMU-innovativ

Laufzeit: 3 Jahre

Start: Sommer 2022

Projektleitung:

Envidatec GmbH Hamburg

Weiterer Projektpartner:

Vilisto GmbH, Hamburg

Teilprojektleitung HAW:

Gerwald Lichtenberg, LS

Wissenschaftliches Personal:

!! GESUCHT !!

ENVIDATEC GROUP

vilisto

## Kontakt

Deutsches Elektronen-  
Synchrotron DESY

[www.desy.de](http://www.desy.de)

Torben Warnecke M.Sc.

E-Mail: [torben.warnecke@desy.de](mailto:torben.warnecke@desy.de)

Tel.: +49 176 470 88293

Prof. Dr. Gerwald Lichtenberg

E-Mail: [gerwald.lichtenberg@haw-hamburg.de](mailto:gerwald.lichtenberg@haw-hamburg.de)

Tel.: +49 40 428 75-6433

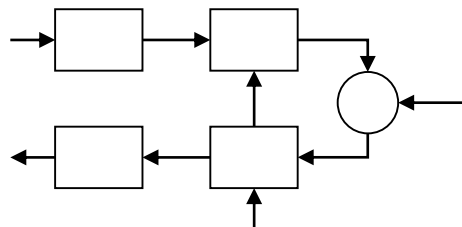




## 2. Energetische Optimierung des DESY-Gebäudebetriebs

Weiterentwicklung moderner multilinearer modellbasierte Regelungskonzepte

Torben Warnecke, M.Sc.  
Maschine-Kraft-Kühlung  
Klimatisierung und Wärmeversorgung -MKK 3-



Prof. Dr. Gerwald Lichtenberg  
Fakultät Life Sciences  
Physics & Control Systems

# Multilineare zeitinvariante Modelle

## MTI-Models

Nichtlinear:

$$\dot{x} = f(x, u_1, u_2) = a + e^{\sin \frac{u_1}{u_2}} + b \cos x \dots$$

Linear:

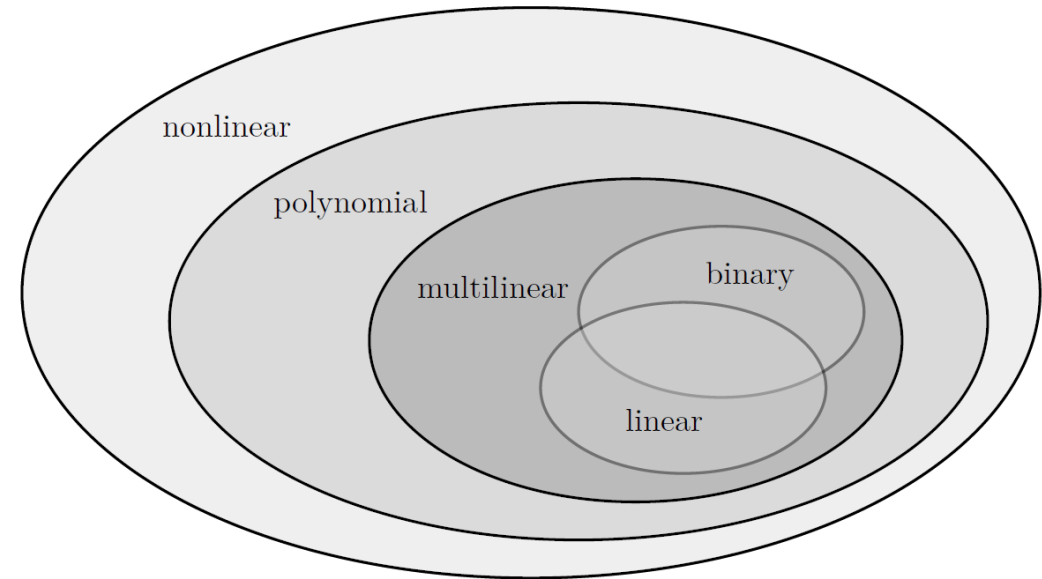
$$\dot{x} = a_1 x + a_2 u_1 + a_3 u_2$$

Polynomisch:

$$\dot{x} = a_0 + a_1 x^3 + a_2 x + a_3 u_1 + a_4 x u_1 u_2^2$$

Multilinear:

$$\dot{x} = a_0 + a_1 x + a_2 u_1 + a_3 u_2 u_3 + a_4 u_2 u_4$$



[Lichtenberg et al. 2022]



# Implizite Multilineare Modelle

explicit multilinear time-invariant (eMTI) models:

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{m}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u})$$

$$\dot{x} = a_0 + a_1 x + a_2 u_1 + a_2 u_2 u_3 + a_4 u_2 u_4$$

Implicit multilinear time-invariant (iMTI) models:

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{m}(\dot{\boldsymbol{x}}, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{u})$$

$$0 = a_0 + a_1 \dot{x} + a_2 x + a_3 \dot{x} x u_3 + a_4 u_1 u_3 + a_5 u_2 u_4$$

# Veröffentlichungen

## Multilineare zeitinvariante Tensor-Modelle (in der Energieversorgung)

- (1) Pangalos, G., Eichler, A., & Lichtenberg, G. „Tensor systems : multilinear modeling and applications“. *SciTePress*. 2013
- (2) Kai Kruppa. “Multilinear Design of Decentralized Controller Networks for Building Automation Systems”, Dissertation, HafenCity Universität Hamburg, 2018
- (3) G. Lichtenberg et al. „Implicit Multilinear Modeling“, at - Automatisierungstechnik 2022
- (4) Kruppa, K. and Lichtenberg, G. “Feedback Linearization of Multilinear Time-invariant Systems using Tensor Decomposition Methods”. In Proceedings of 8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications – SIMULTECH, 2018
- (5) G. Pangalos, A. Eichler, G. Lichtenberg. „Hybrid Multilinear Modeling and Applications“. In Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications , Springer International Publishing, 2015
- (6) K. Kruppa, G. Pangalos, G. Lichtenberg. „Multilinear Approximation of Nonlinear State Space Models“. IFAC Proceedings Volumes. Volume 47, Issue 3, 2014, Pages 9474-9479
- (7) ...

# Warum multilineare Modelle

## Für Feuchte Luft und RLT-Anlagen

Beispiel: Energieinhalt feuchter Luft (spez. Enthalpie in J/kg):

$$h_{1+x,0^{\circ}C}(\vartheta, \mu) = c_{p,tr.L} \cdot \vartheta + r_0 \cdot \mu + c_{p,WD} \cdot \mu \cdot \vartheta = \begin{pmatrix} 0 & c_{p,tr.L} & r_0 & c_{p,WD} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \vartheta \\ \mu \\ \vartheta\mu \end{pmatrix}$$

Leistung im Massenstrom (Enthalpiestrom  $\dot{H}$  in W):

$$\dot{H} = \dot{V}\rho \cdot (c_{p,tr.L} \cdot \vartheta + r_0 \cdot \mu + c_{p,WD} \cdot \mu \cdot \vartheta) = \begin{pmatrix} 0 & c_{p,tr.L} & r_0 & c_{p,WD} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \dot{V}\rho\vartheta \\ \dot{V}\rho\mu \\ \dot{V}\rho\mu\vartheta \end{pmatrix} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{m}(\dot{V}, \mu, \vartheta, \rho)$$

Konstanten

Variablen

# Beispiele aus der Gebäudetechnik

## Heizungstechnik

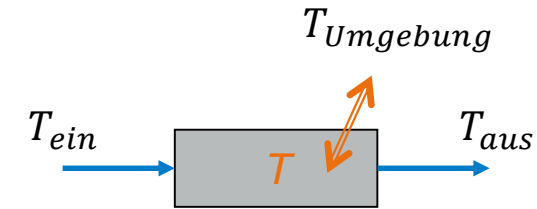
Durchflossener Körper:

$$\dot{T} = \frac{\delta}{m} \dot{V} (T_{ein} - T_{aus}) + \frac{kA}{c_p m} (T_{Umgebung} - T)$$

$$\dot{T} = -\frac{kA}{c_p m} T + \frac{kA}{c_p m} T_{Umgebung} + \frac{\delta}{m} \dot{V} T_{ein} - \frac{\delta}{m} \dot{V} T_{aus}$$

$$\dot{T} = a_1 T + a_2 T_{Umgebung} + a_3 \dot{V} T_{ein} + a_4 \dot{V} T_{aus} \longrightarrow \dot{x} = a_1 x + a_2 u_1 + a_3 u_2 u_3 + a_4 u_2 u_4$$

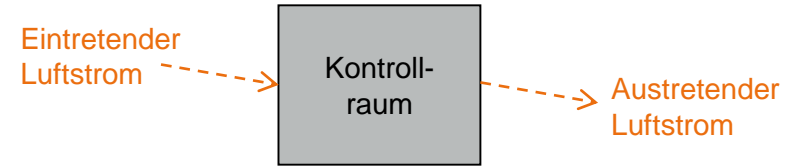
$$\dot{T} = (a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4) \cdot \begin{pmatrix} T \\ T_{Umgebung} \\ \dot{V} T_{ein} \\ \dot{V} T_{aus} \end{pmatrix} = (a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4) \cdot \begin{pmatrix} x \\ u_1 \\ u_2 u_3 \\ u_2 u_4 \end{pmatrix}$$



# Beispiele aus der Gebäudetechnik

## Raumluftechnik

Wärmeaustausch  $\dot{Q}$  durch Luftwechsel:



$$\dot{Q} = \dot{H}_{in} - \dot{H}_{out} = \rho \cdot \dot{V} \cdot (h_{in} - h_{out}) = \begin{pmatrix} 0 & c_{p,tr.L} & r_0 & c_{p,WD} \end{pmatrix} \cdot \left[ \begin{pmatrix} 1 \\ \rho \dot{V} \vartheta_{in} \\ \rho \dot{V} \mu_{in} \\ \rho \dot{V} \vartheta_{in} \mu_{in} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ \rho \dot{V} \vartheta_{out} \\ \rho \dot{V} \mu_{out} \\ \rho \dot{V} \vartheta_{out} \mu_{out} \end{pmatrix} \right]$$

$$= \begin{pmatrix} c_{p,tr.L} & r_0 & c_{p,WD} & -c_{p,tr.L} & -r_0 & -c_{p,WD} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \rho \dot{V} \vartheta_{in} \\ \rho \dot{V} \mu_{in} \\ \rho \dot{V} \vartheta_{in} \mu_{in} \\ \rho \dot{V} \vartheta_{out} \\ \rho \dot{V} \mu_{out} \\ \rho \dot{V} \vartheta_{out} \mu_{out} \end{pmatrix}$$

Stoff- und Anlagenkonstanten

$$\dot{H} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{m}(\underbrace{\dot{V}, \mu, \vartheta, \rho}_{\text{Massenbeziehung}}) \longrightarrow \dot{Q} = \dot{H}_{in} - \dot{H}_{out} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{m}(\dot{V}_{in}, \mu_{in}, \vartheta_{in}, \rho_{in}, \dot{V}_{out}, \mu_{out}, \vartheta_{out}, \rho_{out})$$

Thermische Zustandsgrößen

*Kennt man die Ein- und Austrittszustände lassen sich sehr kompakt die Energiebilanz ziehen*

→ Die Anwendbarkeit multilinearer Modelle auf HLK-Systeme, insbesondere Raumluftechnischer-Anlagen, wurde bereits in der Dissertation „Multilinear Design of Decentralized Controller Networks for Building Automation Systems“ [K. Kruppa 2018] aufgezeigt

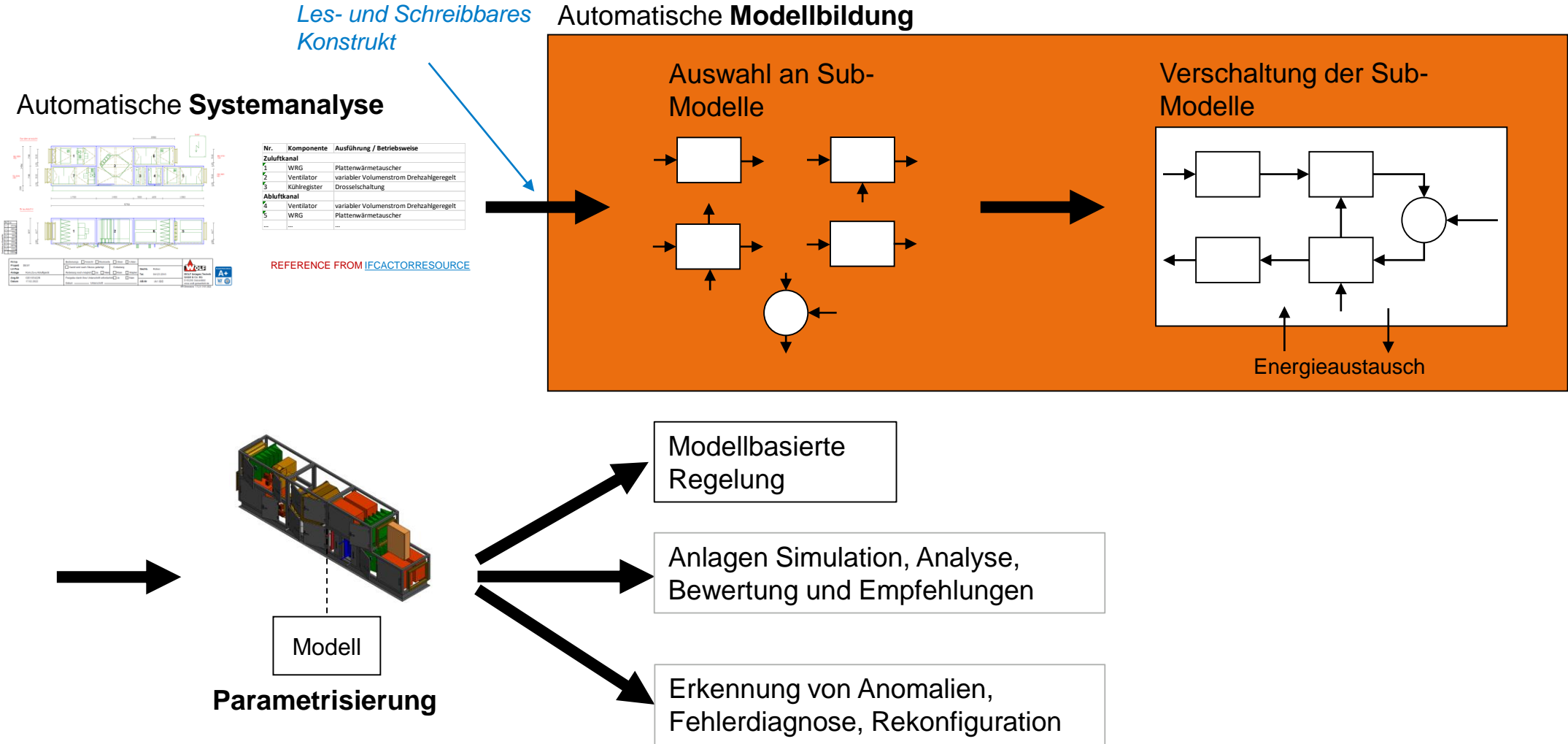
# Forschungsprojekt: SOMA-HVAC

## Zusammenfassung

- Erwartung:
  - Generische, allgemeingültige Ansätze für HVAC-Systeme
  - Implizite multilineare Modelle ermöglichen jede Kompositionen mehrerer implizit multilinearer Sub-Modelle unter Erhaltung der impliziten multilinearen Struktur (parallele, serielle und feedback Schaltungen) [G. Lichtenberg et al. „Implicit Multilinear Modeling“, at - Automatisierungstechnik 2022]
  
- **Ziel:**
  - **Automatisierte Modellierung aller RLT-Anlagen DESYs (...auf Knopfdruck?)**
  
- Ausblick:
  - Energie- und kostenoptimierte Regelung wesentlicher Anlagen unter Erhalt aller Anforderung
  - Energie- und kostenoptimierte Anlagenkonzepte und -auslegungen

# Ansatz

## Komposition der Modelle durch implizite multilinearer Modellstrukturen\*



# Anwendung

## Wofür können die Modelle genutzt werden?

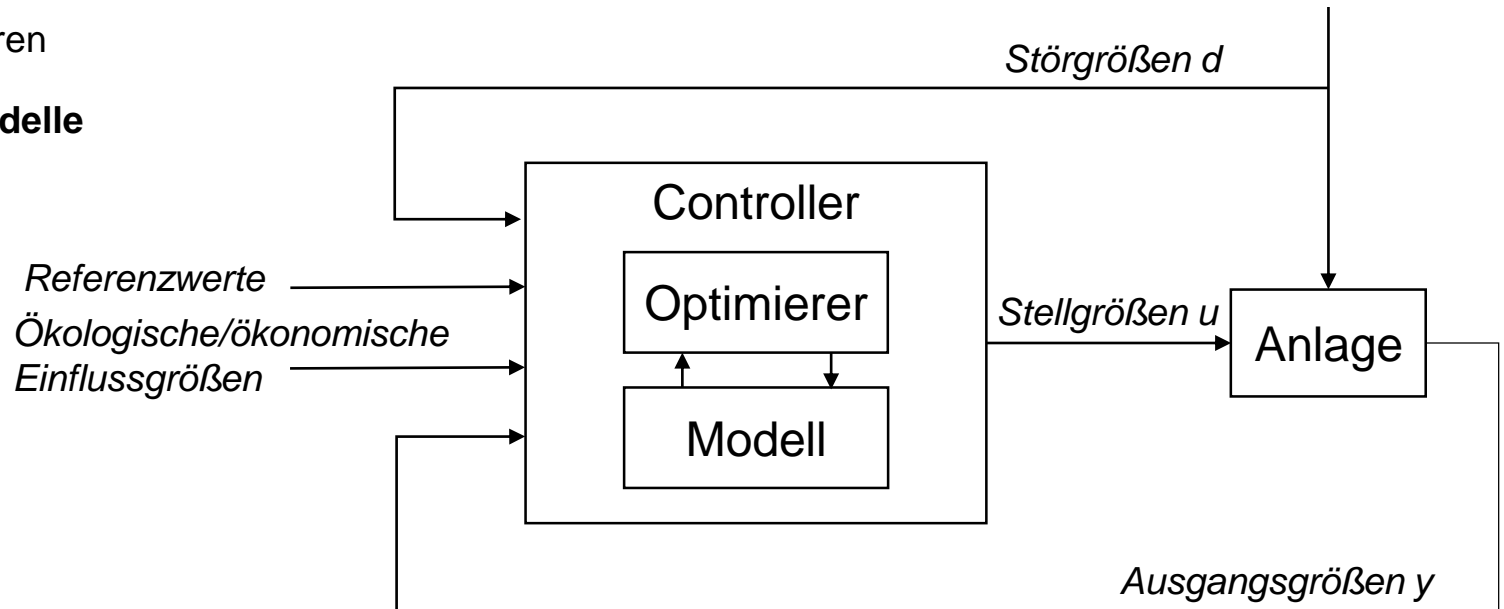
- **Energetisch und ökonomisch optimierende Plug-and-Play-Regelung von RLT-Anlagen**  
Mithilfe von economic-modelbased-predictive-control Algorithmen,  
bspw. Durch das Einbinden innerhalb einer bestehenden Internet-Betriebssoftware oder durch einen nachrüstbaren I-PC / Microcontroller,  
Einbindung von Prognosen, wie Wetter-Prognosen
- **Rechnergestützte Analyse bestehender und zu planender Systeme**  
Automatisierte Energetische Inspektion gem. DIN SPEC 15240 / § 12 EnEV,  
Automatisierte Empfehlungen zum Anlagenumbau/-anpassung für eine höhere Energieeffizienz oder zum Erhalt der  
Raumluftanforderungen,  
Analyse ob sich zuvor erwähnte Regelung für ein Bestandssystem lohnt,  
Analyse unterschiedlicher Anlagenkonzepte durch „vereinfachte“ Modellbildung,  
Abbildung von Nutzungsorientierten KPIs im Energiemonitoring,  
Umwandlung von Darstellungen aus Energiemonitoring-Software direkt in Modelle, durch Hinterlegte Sub-Modelle und Verknüpfungen
- **Fehlerdiagnose und adaptiver Betrieb**  
z.B. bei Anlagenverschleiß wie belegte Filter oder bei Anlagenschäden wie bspw. einer defekten Kaltwasser-Pumpe,  
Vorrausschauende Wartung



# Modellbasierte Regelung

## Economic Modelbased Predictive Control (eMPC)

- In der Prozessindustrie etabliertes Standardverfahren
- Berücksichtigung der **Anlagendynamik durch Modelle**
- Handling von **Mehrgrößensystemen**
- Berücksichtigung **konkurrierender Regelziele**



- Optimieren der Regelgrößen auf Basis einer **Prognose** der Systemzustände und Eingangsgrößen,
  - auch bspw. [Wetter-Prognosen](#) und Prognosen der Raumbelagungen
- Berücksichtigung von **ökologischen und ökonomischen Randbedingungen**:
  - Echtzeitdaten zu [Energiekosten](#), [Primärenergiebedarfe](#) und [Emissionen](#) unterschiedlicher Energiequellen (Wärme, Kälte, Elektrizität)

# Weitere Möglichkeiten

➤ **Modellerweiterung und Kopplung mit weiteren Systemen**, wie z.B. Umluft-Kühlgeräte, statische Heizkörper, redundante Systeme etc.

➤ **BIM4HVAC: Modellbildung aus Informationen der BIM-Modelle** [Xue Yang ; and Semiha Ergon, 2014, „Towards a Formal Approach for Determining Functions of HVAC Components Represented in IFC”] (Python-Tool python-materialsdb library to convert IFC to Python)

[Jansen, D. et al (2021). BIM2SIM -Development of semi-automated methods for the generation of simulation models using Building Information Modeling. RWTH Aachen]

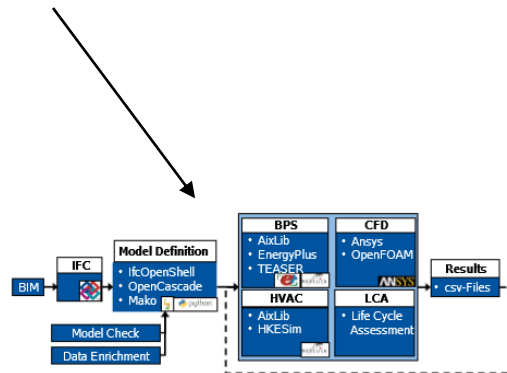
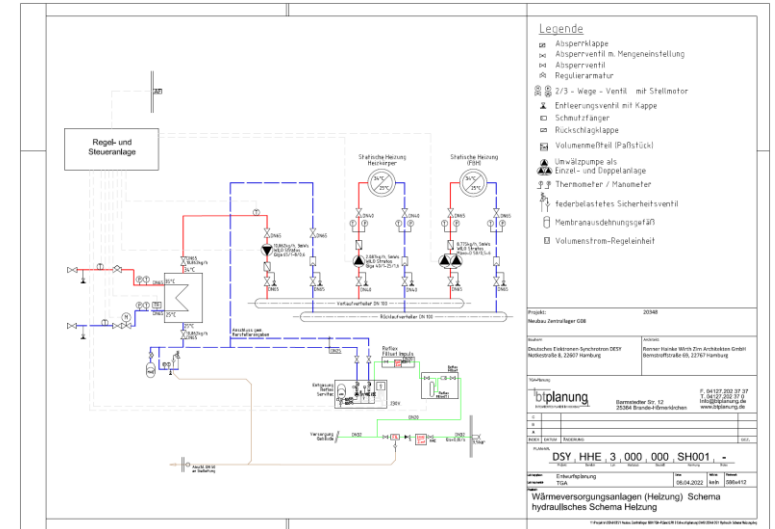


Figure 1: BIM2SIM Toolchain



Beispiel: Statische Heizung und Heizwasser-Verteilung mit Fernwärme-Wärmeübertrager

# Weitere Möglichkeiten

- **Übergeordnete Modelle bis hin zum Campus-Modelle**  
für höhere Management Entscheidungen  
z.B. Wartungsoptimierung aller Anlagen,  
Optimierung durch Ausnutzen von Redundanzen (Welche Betriebskombinationen sind optimal?)
- **Sektorkopplung:  
Demand-Side-Response**  
bspw. durch das Ausnutzen von Sollwert-Toleranzen, Skalierbar durch übergeordnetes Campus-Modell  
[X. Kou *et al.*, 2021, "Model-Based and Data-Driven HVAC Control Strategies for Residential Demand Response,“]
- **Implementierung lernender Algorithmen zur Optimierung von Sollwerten,**  
z.B. Anpassung an das Nutzerverhalten

# Forschungsschwerpunkte

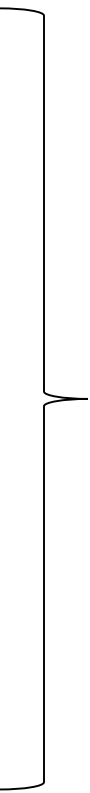
## Technisch und Mathematisch

### Technische Forschungsgebiete:

- Energetisch optimierende Koordinations-Regelung für RLT-Anlagen
- Automatisierter Modell- und Reglerentwurf

### Mathematische Forschungsgebiete:

- Coupled iMTI-Models for energetic and comfort optimization
- Closed-Loop Parameteridentification with iMTI-Systems
- robust-control on iMTI-Systems
- discrete event models for iMTI-Systems



Methoden entwickeln die auch außerhalb der  
Raumluftechnik anwendbar sind

# Veröffentlichung und Software-Tools

## HVAC-Modellierung und Anwendungen

### Veröffentlichungen:

- (1) Ye Yao; and Yuebin Yu. „Modeling and Control in Air-conditioning Systems“, Springer, Berlin, Heidelberg 2017
- (2) Omid Asvadi-Kermani & Hamidreza Momeni „A constrained distributed time-series neural network MPC approach for HVAC system energy saving in a medium-large building“, *Journal of Building Performance Simulation*. 2021, 14:4, 383-400
- (3) M. Elnour and N. Meskin. "Multi-zone HVAC control system design using feedback linearization," *2017 5th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)*, 2017, pp. 249-254
- (4) Lionello, M, Lucchese, R, Rampazzo, M, Guay, M, Atta, K. „Energy-efficient operation of indirect adiabatic data center cooling systems via Newton-like phasor extremum seeking control“. *Int J Adapt Control Signal Process*. 2021; 35: 1298– 1315
- (5) ...
- (6) Jansen, D. et al (2021). BIM2SIM -Development of semi-automated methods for the generation of simulation models using Building Information Modeling. RWTH Aachen
- (7) ...

→ Viele Ansätze zur Lösung einzelner Aufgabenstellungen

# Veröffentlichung und Software-Tools

## HVAC-Modellierung und Anwendungen

### Software-Tools:

- (1) CARNOT-Toolbox: Conventional And Renewable eNergy systems Optimization Toolbox in Matlab/Simulink
- (2) HeatLib in Matlab/Simulink
- (3) Tespy: stationary operation of Thermal Energy Systems in Python
- (4) Psypy: psychrometric states of moist air in Python
- (5) CoolProp: Coolant Properties in Python
- (6) Dymolia Modelica, typischerweise genutzt zum Design und Auslegen von Anlagen
- (7) HKESim: Modelica Bibliothek (Dymolia) für HVAC-Systeme von ROM-Technik zur Jahressimulation (nur intern? Nicht OpenSource)
- (8) HVAC-Library: Modelica Bibliothek (Dymolia) von Claytex, typischerweise zur Jahressimulation
- (9) Modelica Buildings library: open-source Modelica library
- (10) ...

→ Software-Bibliotheken zielen vor allem auf die Simulationen (Jahressimulationen) von Anlagen und insbesondere gesamter Gebäude ab, um die Anlagenauswahl und Auslegung zu verbessern, Betriebsoptimierung nicht im Vordergrund