

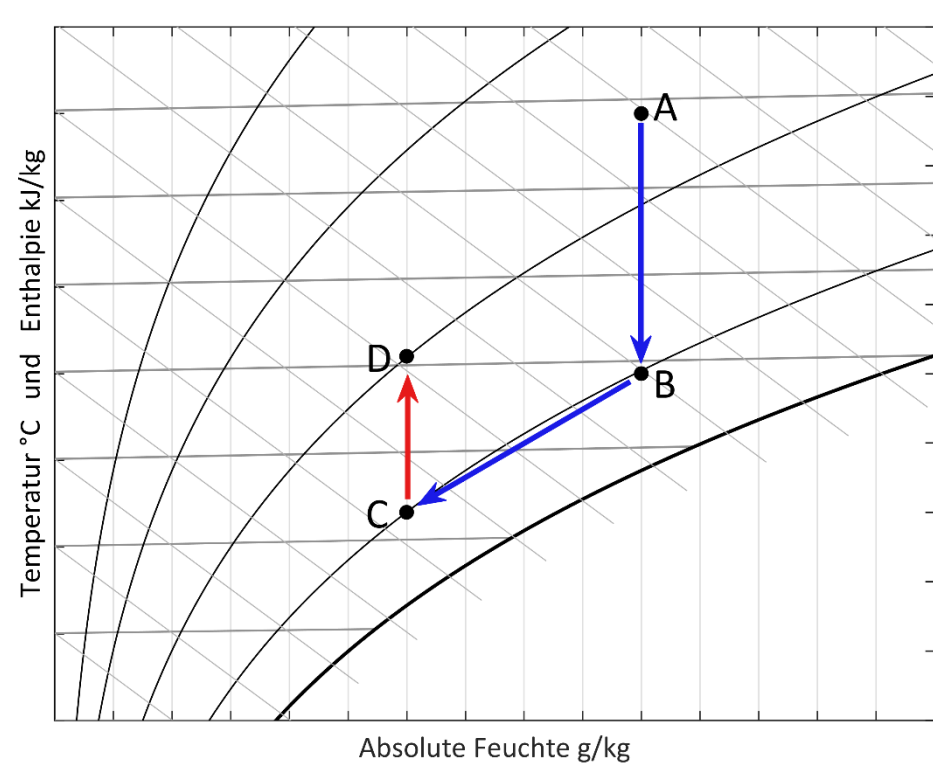
Motivation

Im Forschungsvorhaben OpReeBek² [1] wird das Vorgängerprojekt OpDeCoLo - Optimized Dehumidification Control Loop - fortgeführt. Ziel ist die energieeffiziente Klimatisierung von Räumen mittels modellbasierter Regelstrategien. Dazu wird die Zuluft ohne Nacherwärmung oder Befeuchtung konditioniert. Dies wird mittels eines mengengeregelten Luftkühlers und Bypass um den Luftkühler realisiert. Das Konzept wird an einer Laboranlage validiert und ist auf Bestandsanlagen übertragbar.

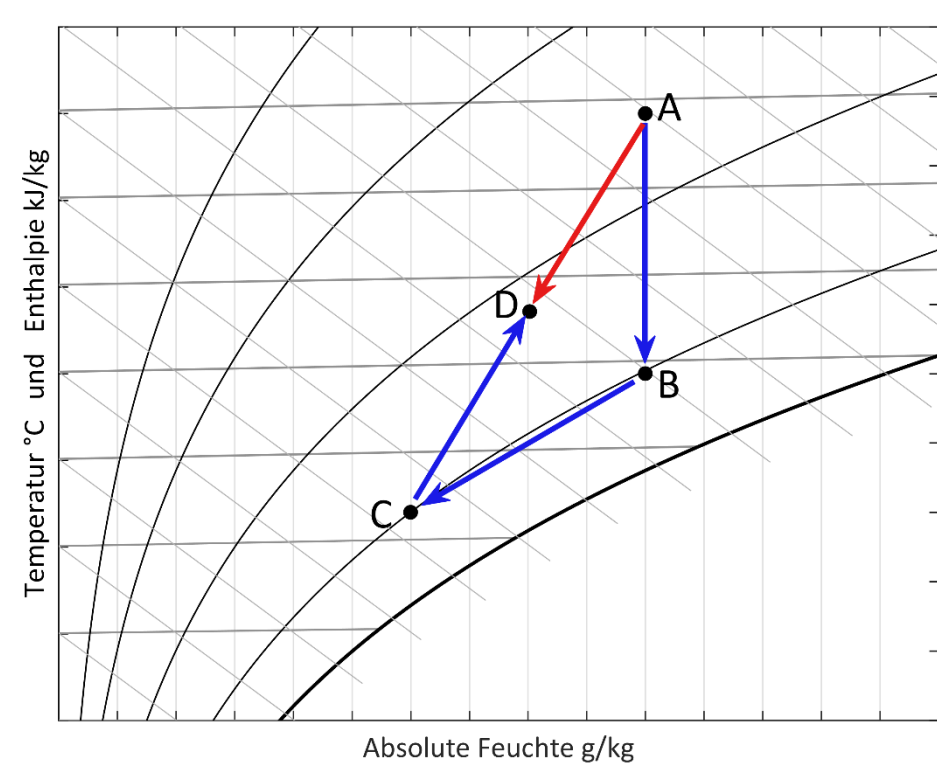
Projektidee

Ist die Luftfeuchte der Außenluft höher, als die der Raumluft, muss die Außenluft entfeuchtet werden. Dabei erfolgt die Aufbereitung der Außenluft bei konventionellen Anlagen, indem zunächst gekühlt und damit entfeuchtet wird. Zur Entfeuchtung ist die Taupunkttemperatur der Luft zu unterschreiten. Daraus folgt die Notwendigkeit, anschließend die Luft wieder zu erwärmen.

Durch den Einsatz eines Luftbypasses soll nur ein minimal notwendiger Luftmassenstromanteil entfeuchtet werden, um nach Mischung von behandelter und unbehalteter Luft den notwendigen Zuluftzustand zu erreichen. Die fehlende Nacherwärmung bedeutet automatisch eine Energieeinsparung.



Entfeuchtung und Nacherwärmung



Entfeuchtung und Bypass

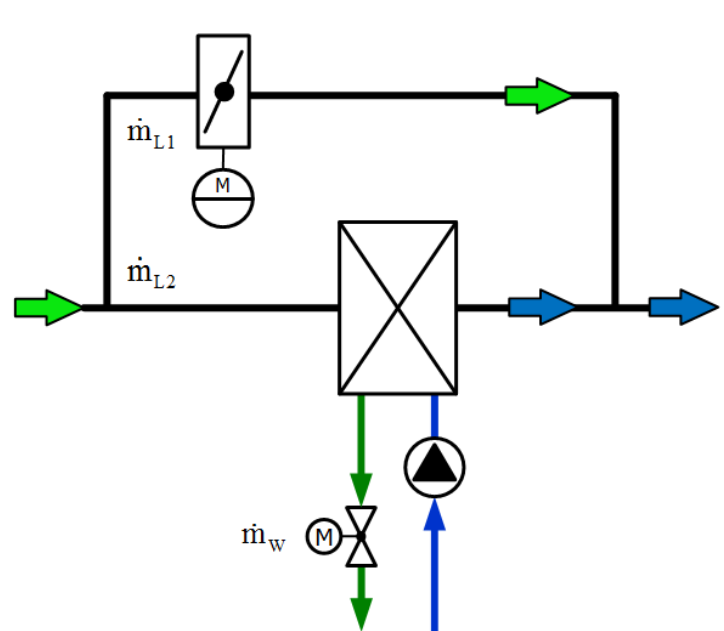
Beispiel

Die erwarteten Energieeinsparungen unter den klimatischen Bedingungen wie sie im Raum Berlin anzutreffen sind belaufen sich auf 35 % (mit Entfeuchtung) bzw. auf 18 % (ohne Entfeuchtung). Für eine Anlage mit Luftvolumenstrom von 3000 m³/h ergibt sich daraus eine Einsparung der Betriebskosten in Höhe von 175 €, bzw. 14 %.

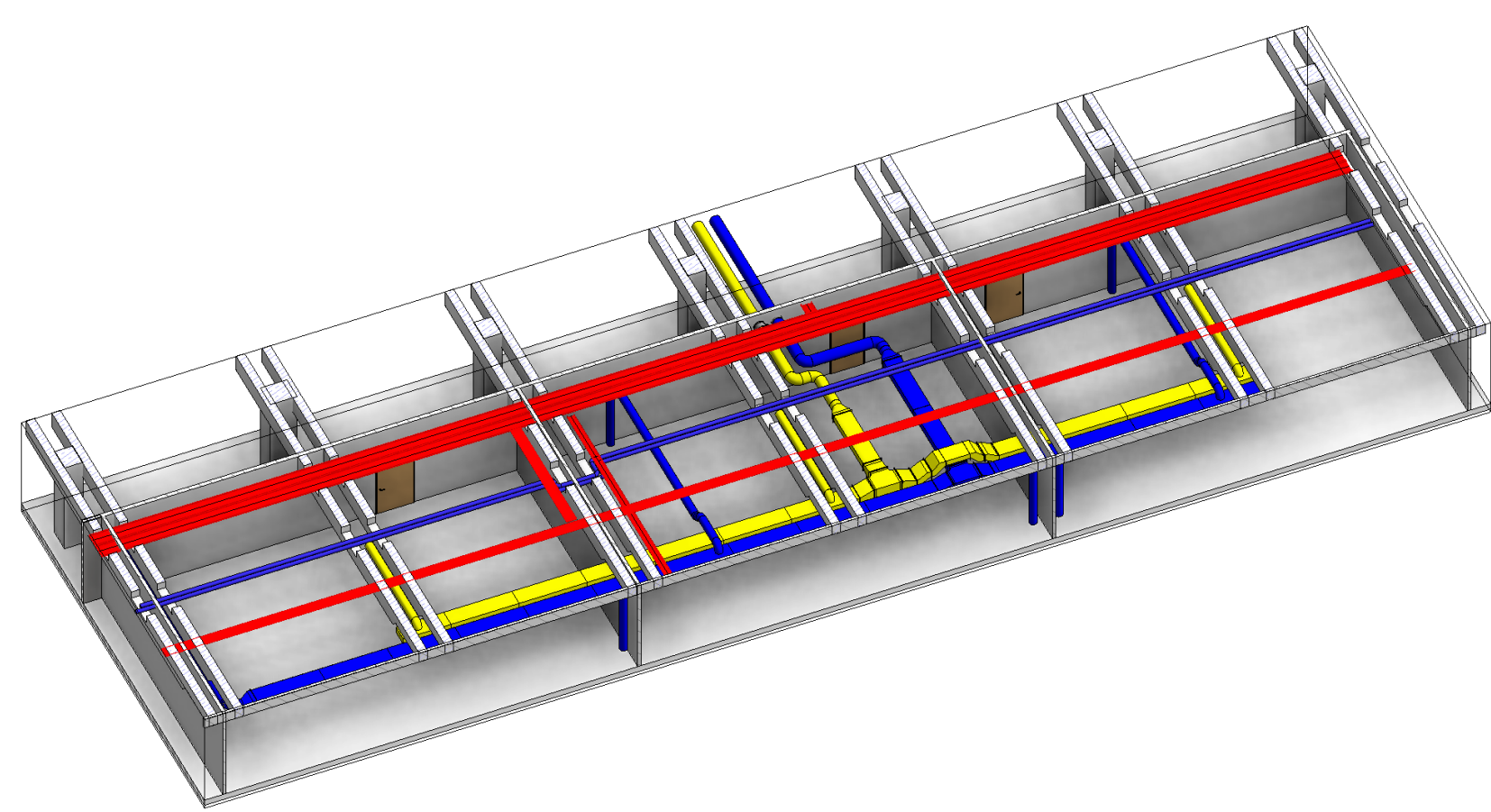
Laboranlage

Am Standort der HTW Berlin ist eine funktionsfähige Vollklimaanlage für Laborversuche verfügbar. Zur Bereitstellung der notwendigen Lufteingangsbedingungen ist der Anlage eine weitere Vollklimaanlage (Simulationseinheit) vorgeschaltet.

Die Simulationseinheit stellt die Kondition der Zuluft (Temperatur und Luftfeuchte) ein. Der mengengeregelte Wärmeübertrager mit einer Nennleistung von 21 KW dient zum Kühlen und Entfeuchten der Luft. Er wird durch einen geregelten Luftbypass ergänzt. Die zu klimatisierenden Räume werden mittels Volumenstromregler mit einem variablen Strom an konditionierter Luft versorgt.



Wärmeübertrager mit Luftbypass



Verteilung der Zuluft in die Räume

Ausblick

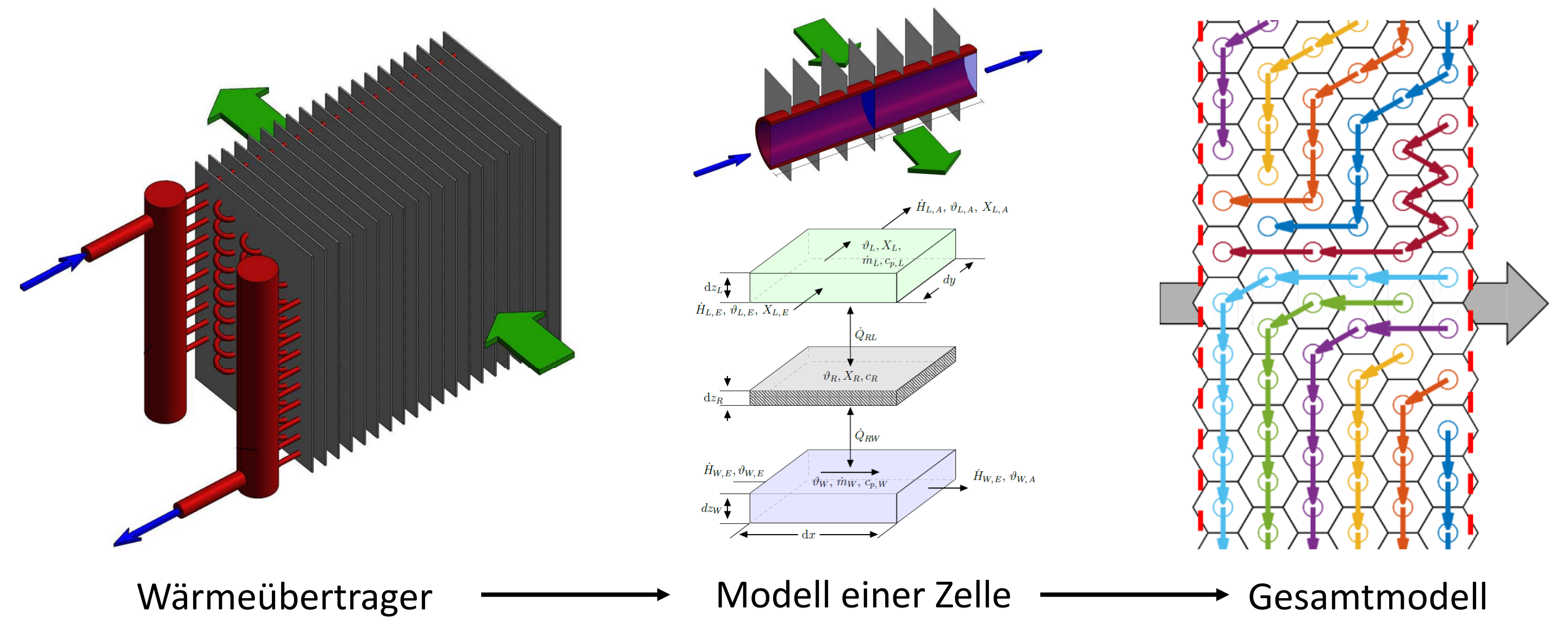
Eine weitere Optimierungsidee liegt im Bereich der Bereitstellung des Kaltwassers. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Klimaanlage, an denen durch Regeleinrichtungen die Vorlauftemperatur durch Wasser-Mischung bereitgestellt wird, soll im Teilprojekt DeCoSuLo die notwendigen Temperatur direkt am Kälteerzeuger eingestellt werden. Dadurch soll der Leistungsaufwand für die Kaltwassererzeugung verringert werden.

Weiterhin ist das mathematische Modell in der Lage Störungen am Wärmetauscher, wie inhomogene Luftströmung und veränderte Wasserführung darzustellen. Diese Phänomene können damit sowohl experimentell in der Laboranlage, als auch numerisch in der Simulation untersucht werden.

Abschließend sind unterschiedlichste Reglerkonzepte im Bereich der Zustandsregelung denkbar. Diese Regler sollen durch verschiedene Mikro-Controller realisiert und getestet werden.

Modell

Kernstück der Modellierung ist der Wärmeübertrager. Dieser wird in Zellen unterteilt, in denen die Gleichungen der Energiebilanz gelöst werden [2,3]. Aus den Modell einer Zelle entsteht durch Zusammenschaltung aller Zellen das Gesamtmodell.



Die System- und Ausgangsgleichung mitsamt nichtlinearer Koeffizienten lauten:

$$\dot{x} = Ax + Bu + a \quad A = \begin{bmatrix} -f_1 - f_2 & f_1 \\ f_5 & -f_4 - f_5 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} f_2 & f_3(1 - f_6) & 0 \\ 0 & 0 & f_4 \end{bmatrix} \quad a = \begin{bmatrix} -f_3(1 - f_6)x_t \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$y = Cx + Du + b \quad C = \begin{bmatrix} 1 - f_7 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} f_7 & 0 & 0 \\ 0 & f_6 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ x_t(1 - f_6) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f_1 = \frac{\alpha_w A_w}{m_t c_{p,t}} \quad f_2 = \frac{\alpha_a A_a \psi_a}{m_t c_{p,t} \kappa_a} \quad f_3 = \frac{\beta A_a T D}{m_t c_{p,t} \kappa_d} \quad f_6 = \begin{cases} \exp(-\kappa_d) & , x_{a,in} \geq x_t \text{ (feucht)} \\ 1 & , x_{a,in} < x_t \text{ (trocken)} \end{cases}$$

$$f_4 = \frac{2L_z}{T_w h_z} \quad f_5 = \frac{\alpha_w A_w}{m_w c_{p,w}} \quad f_7 = \exp(-\kappa_a)$$

$$x_1 = \vartheta_R \text{ Manteltemperatur} \quad u_1 = \vartheta_{a,in}, \quad y_1 = \vartheta_{a,out} \text{ Lufttemperatur am Eingang/Ausgang}$$

$$x_2 = \vartheta_w \text{ Zellwassertemperatur} \quad u_2 = x_{a,in}, \quad y_2 = x_{a,out} \text{ relative Luftfeuchte am Eingang/Ausgang}$$

$$x_3 = \vartheta_w \text{ Zellwassertemperatur} \quad u_3 = \vartheta_{w,in}, \quad y_3 = \vartheta_{w,out} \text{ Wassertemperatur am Eingang/Ausgang}$$

Modellreduktion

Das oben vorgestellte nichtlineare Gesamtmodell wird in verschiedenen Arbeitspunkten linearisiert (numerische Berechnung der Jacobi-Matrix). Diese linearisierten Modelle werden anschließend mittels eines Krylov-Unterraum basierten Verfahrens reduziert [3]. Es wird dazu ein zweiseitiger Arnoldi-Algorithmus verwendet, der eine orthonormale, reduzierte Basis sicherstellt.

$$\underbrace{W^T V}_{E_R} \dot{x}_R = \underbrace{W^T A V}_{A_R} x_R + \underbrace{W^T B}_{B_R} u + \underbrace{W^T a}_{a_R} \quad y \approx \underbrace{C V}_{C_R} x_R + Du + b \quad x \approx V x_R$$

Der Linearisierung und Reduktion muss eine Basistransformation auf generalisierte Koordinaten folgen. Dadurch wird die Kompatibilität der verschiedenen Modelle über alle Arbeitspunkte hinweg sichergestellt [4].

$$x \approx V_i x_{R,i} \approx R x_G \quad R^T R = 1 \quad T_i = R^T V_i \quad x_{R,i} \approx T_i^{-1} x_G$$

$$\underbrace{M_i E_{R,i} T_i^{-1}}_{E_i} \dot{x}_G = \underbrace{M_i A_{R,i} T_i^{-1}}_{A_i} x_G + \underbrace{M_i B_{R,i}}_{B_i} u + \underbrace{M_i a_{R,i}}_{a_i} \quad y = \underbrace{C T_i^{-1}}_{C_i} x_G + D_i u + b_i$$

Die generalisierten Koordinaten erlauben nun die Interpolation der verschiedenen Modelle mittels Gewichtsfunktionen.

$$\sum_{i=1}^k \omega_i E_i \dot{x}_G = \sum_{i=1}^k \omega_i A_i x_G + \sum_{i=1}^k \omega_i B_i u + \sum_{i=1}^k \omega_i a_i \quad y \sum_{i=1}^k \omega_i = \sum_{i=1}^k \omega_i C_i x_G + \sum_{i=1}^k \omega_i D_i u + \sum_{i=1}^k \omega_i b_i$$

Diese Gleichungen geben bei geeigneter Wahl der Ordnung der generalisierten Koordinaten das nichtlineare System beliebig genau wieder. Jedes lineare System für sich erlaubt die Synthese eines Mehrgrößenreglers mittels klassischer Methoden.

Literatur

- [1] opreebek2.htw-berlin.de
- [2] Ober (1978): Das Verhalten von Kreuzstromwärmeübertragern beim Kühlen und Entfeuchten von Luft
- [3] Wiening (1987): Zur Modellbildung, Regelung und Steuerung von Wärmeübertragern zum Heizen und Kühlen von Luft
- [4] Salimbahrami, Lohmann, Bechtold (2002): Two-Sided Arnoldi in Order Reduction of Large Scale MIMO Systems
- [5] Panzer, Mohring, Eid, Lohmann (2010): Parametric Model Order Reduction by Matrix Interpolation