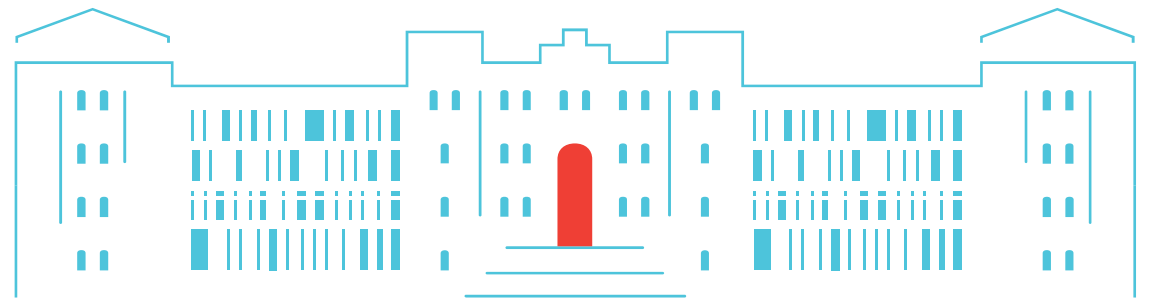


Modellierung und Regelung mehrstufiger Entfeuchtungsprozesse mit Modelica



TUHH
Technische
Universität
Hamburg

22.09.2026



Jan Segura Schreiber, Arne Speerforck

Motivation und Ziele



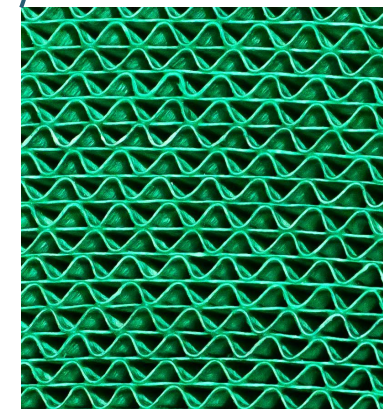
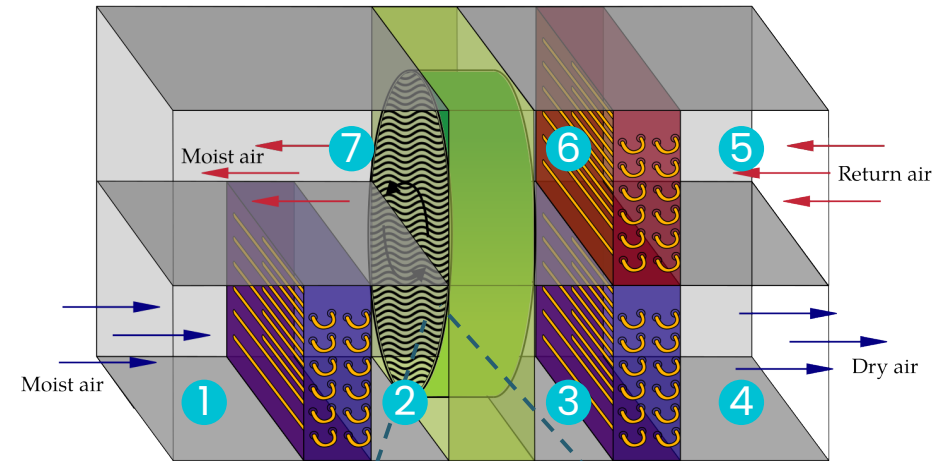
- Tiefenentfeuchtung?
 - Li-Ion-Batterien, Halbleiter, Medizintechnik,...
- Hoher Energieaufwand
 - **25 – 50 % des Energiebedarfs** und 22 % der Emissionen der Produktion von Li-Ionen-Batterien
- Tiefenentfeuchtung:
 - Taupunkt $\vartheta_{DP} = -60 \dots -40 \text{ °C}$
 - Wasserbeladung $x_p < 0,01 \dots 0,1 \frac{\text{g}_w}{\text{kg}_{TrL}}$
 - $\Rightarrow$ Sorptionsgestützte Entfeuchtung



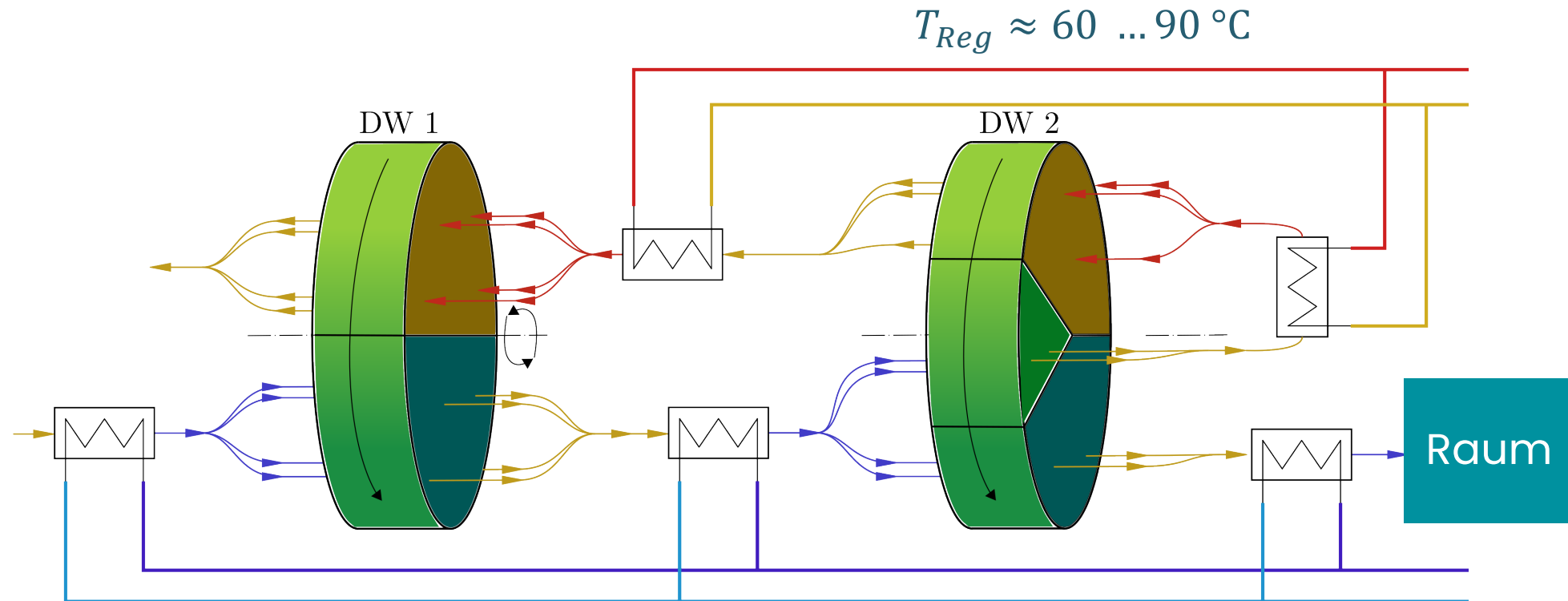
Sorptionsgestützte Entfeuchtung



- Basiert auf hygroskopischen Materialien
 - Silika Gel, LiCl, Zeolithe, ...
 - Realisierung als Sorptionsrad (Desiccant Wheel)
- Mehrstufigkeit:
 - Verringerung des Exergiebedarfs
 - Absenkung der Regenerations-Temperatur

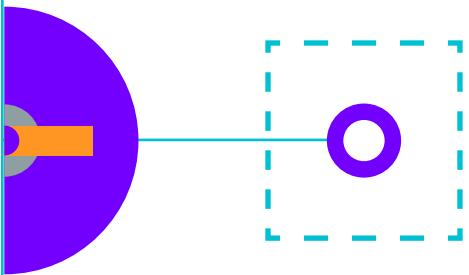


Zweistufige Entfeuchtung



Agenda

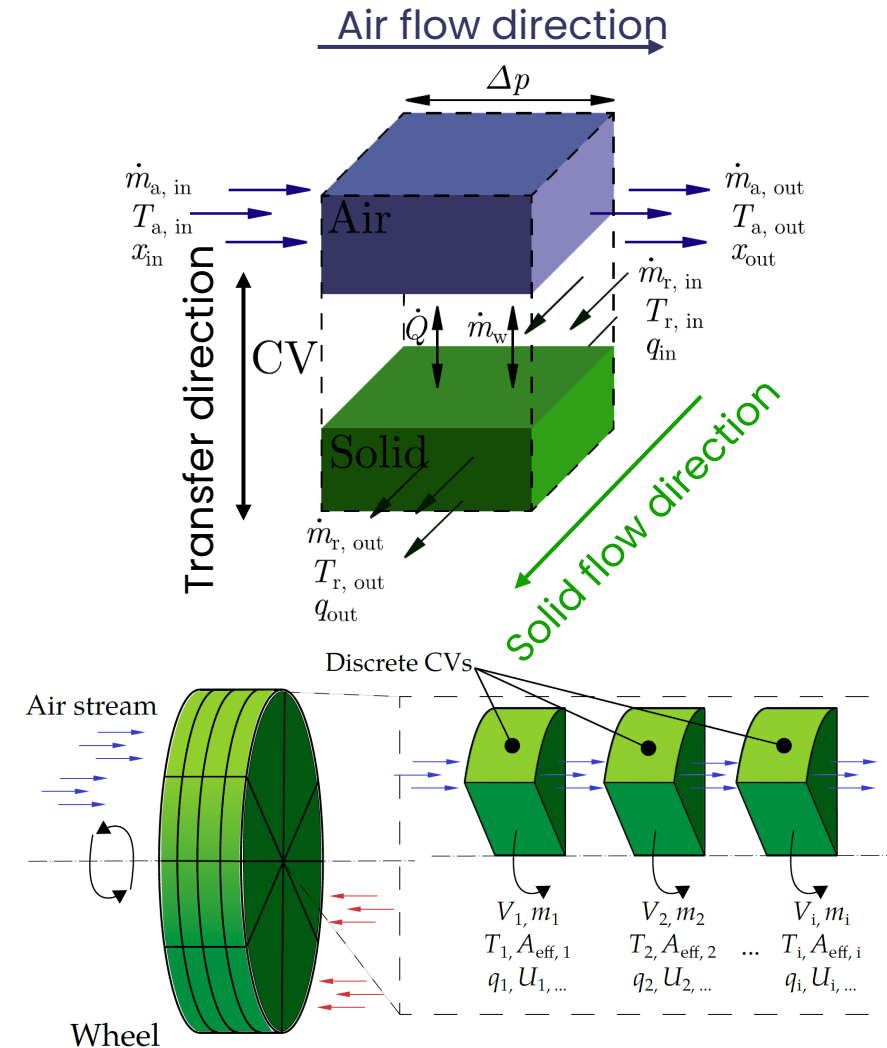
1. Motivation und Ziele
2. Modellierung sorptiver Entfeuchtung
3. Regelung und Optimierung
4. Zusammenfassung



Modellierung Desiccant Wheel



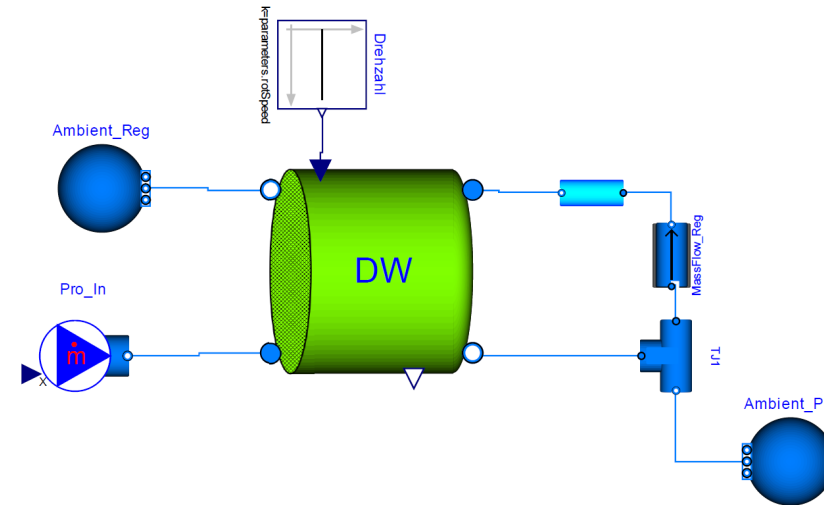
- 2D-Finite-Volumen-Modellierung
 - Radiale und tangentielle Diskretisierung
 - Implementierung in Modelica
- Luft + Solid-Anteile
 - Energie-, Massen- und Impulserhaltung
 - Sorptionsisotherme Gleichgewichtszustand für Sorption
 - Wärme- und Stoffübertragung
 - Empirische Korrelationen
- Validierung:
 - Casas (2005), Wrobel (2013) und Speerforck (2019)



Simulation



- Hohe Anzahl an nicht-linearen Gleichungen
 - Numerisch teuer!
- Kopplung aus Wärme- und Stoffübertragung, Druckverlust mit Luft als ideales Gas
- Einfache Modelle (einstufig, stationär):
 - Annehmbar
- Mehrstufigkeit, Regelung, Dynamik:
 - Unpraktikabel

[illegible][illegible]

Vereinfachung



- Betrachtung von Luft als Nicht-Ideales Gas (Buildings-Library)

- $\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0}$ statt $\rho = \frac{p}{RT}$
(Keine Temperaturabhängigkeit)

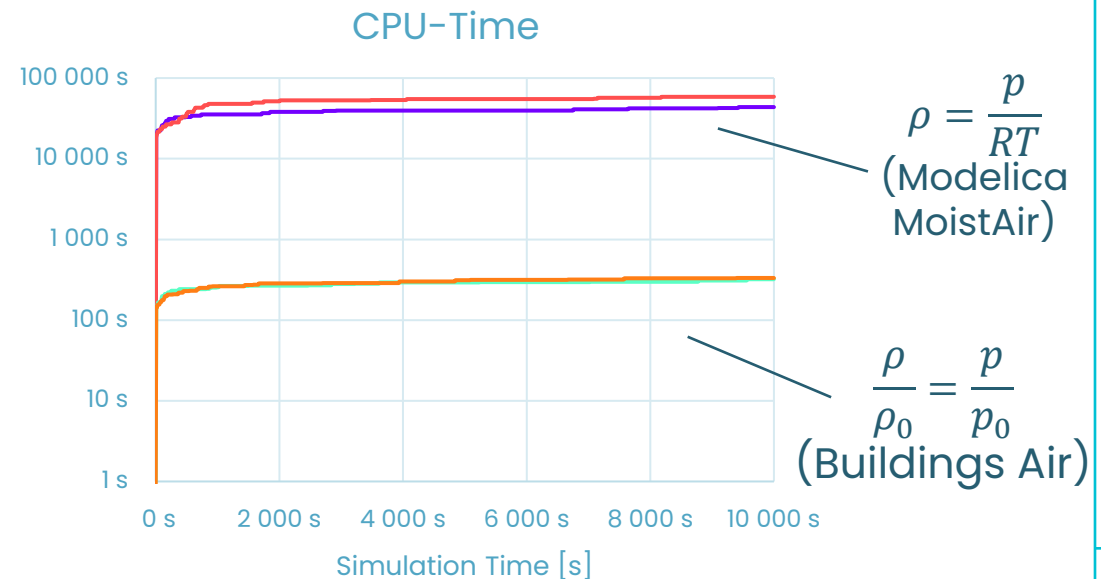
- Zustandsgleichungen werden entkoppelt
- Nichtlinearitäten verschwinden
- Drastische Verbesserung der Simulationszeit
 - Bei gleichen Bedingungen
ca. 200 x schneller



Sizes of nonlinear systems of equations: { }

Sizes after manipulation of the nonlinear systems: { }

Number of numerical Jacobians: 0



Unterschiede und Möglichkeiten mit vereinfachtem Luftmodell

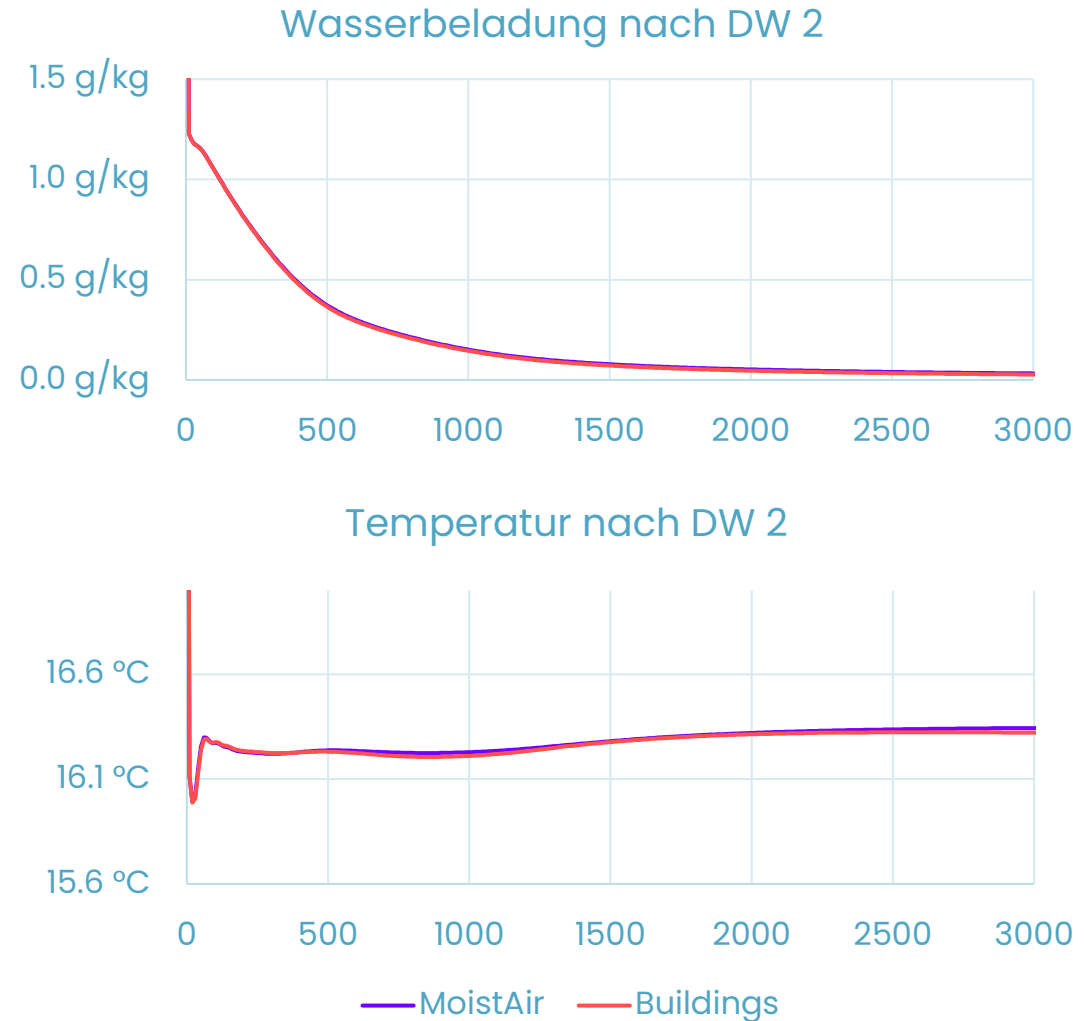


- Genauigkeit Austrittszustand
Prozessluft:

- Wasserbeladung: $\pm 0,005 \frac{g_w}{kg_{TrL}}$
- Temperatur: $\pm 0,05 - 0,25 \text{ K}$
- Dynamik: bleibt erhalten

- Vereinfachtes Luftmodell nutzbar!

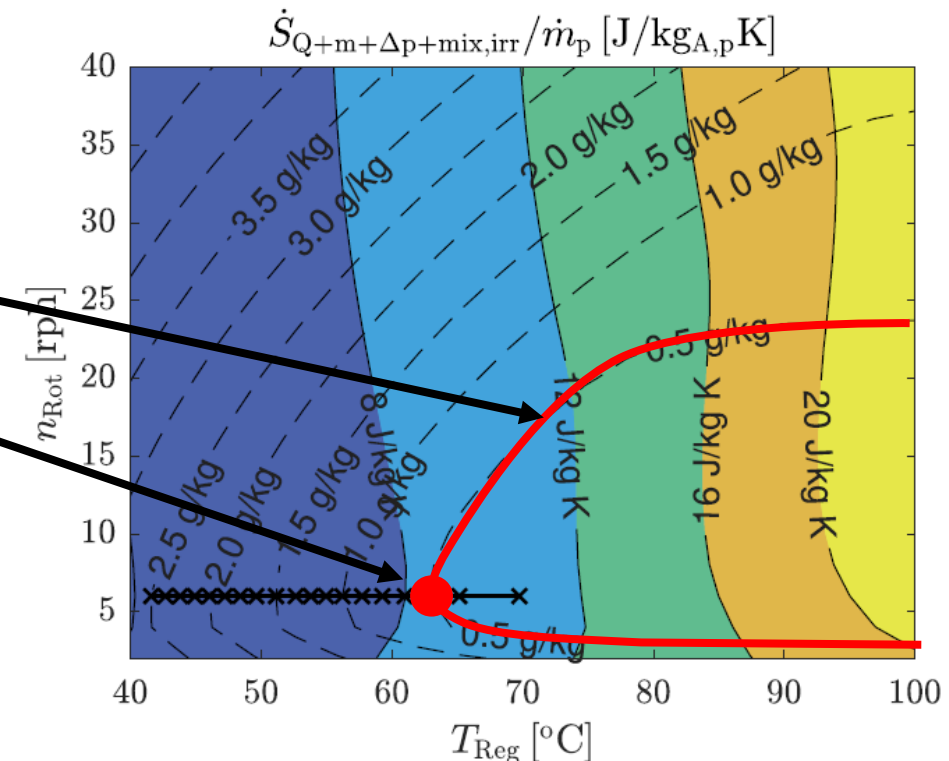
- $\Rightarrow$ Regelung
- $\Rightarrow$ Längere Simulationszeiträume
- $\Rightarrow$ Mehrstufige Systeme



Regelung



- Erkenntnisse aus Untersuchungen zur Entropieproduktion:
 - Wasserbeladung x_{ziel} über mehrere Betriebspunkte erreichbar
 - Minimum an $\dot{S}_{irr} = \text{Optimum}$
- Ziele der Regelung:
 - Optimalen Betriebspunkt finden
 - Optimalen Betriebspunkt halten
 - Trägheit des Systems durch Vorhersage entgegenwirken

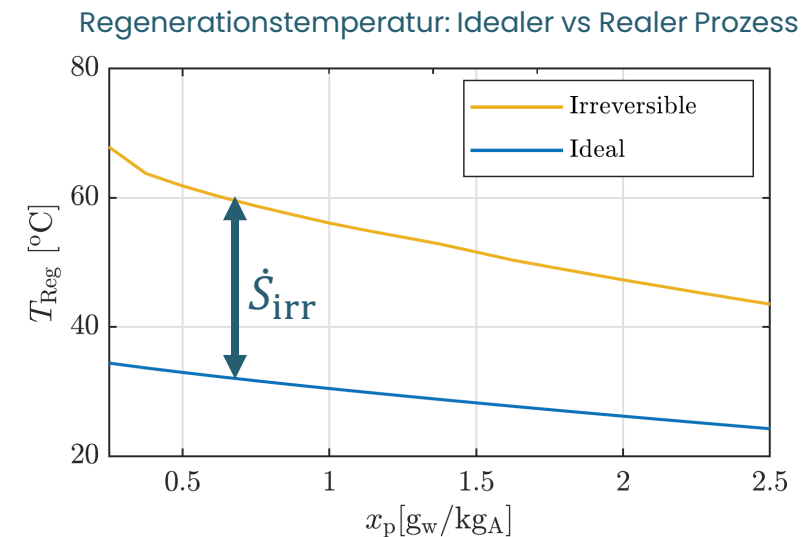
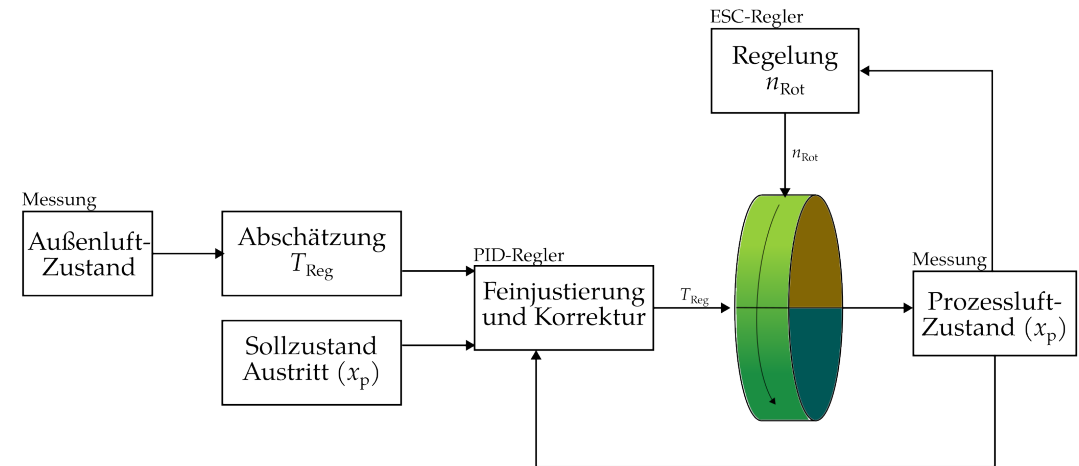


Regelung



- Konzept für zwei Regelgrößen:
 - Regenerationstemperatur T_{Reg}
 - Drehzahl n_{Rot}
 - Abschätzung von T_{Reg} aus Vergleichsprozess:

$$\underbrace{\dot{\dot{E}}_{sep}}_{\dot{E}_{sep} \cong T_{reg}} = \underbrace{(g_p - g_c) - \frac{1}{r}(g_f - g_c)}_{\text{Minimal notwendig (ideal)}} + T_0 \underbrace{\frac{\dot{S}_{irr}}{\dot{m}_p}}_{\text{Entropie-erzeugung}}$$

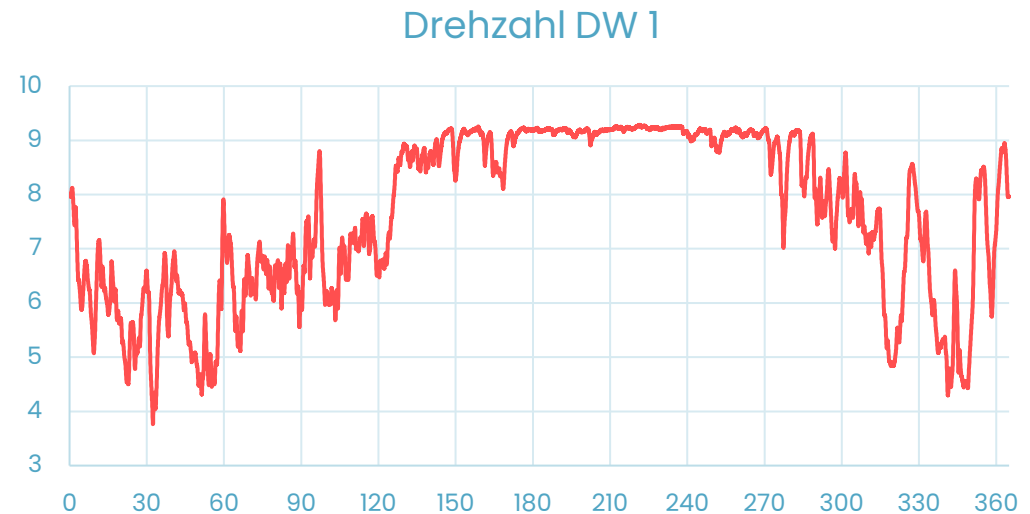
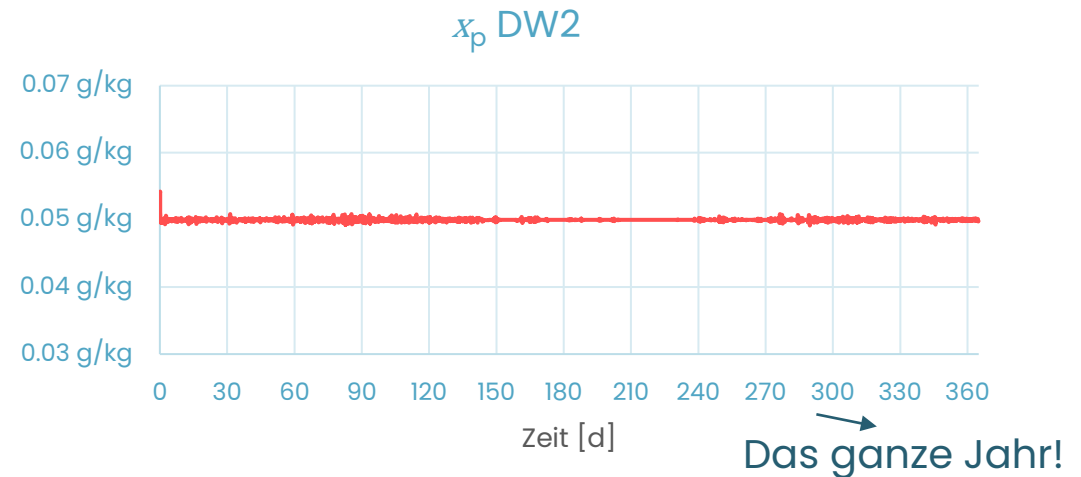




Regelung: Zweistufige Entfeuchtung



- Erkenntnisse und Ergebnisse:
 - Stabilität des Zustandes nach DW1 entscheidend
 - Optimaler Betriebspunkt wird gefunden und gehalten
- Unterschiede je nach Jahreszeit
 - Optimaler betriebspunkt unterschiedlich!
 - Winter: Weniger Entfeuchtung
 - Sommer: Mehr Entfeuchtung





- Sorptionsprozess durch CV-Ansatz modellierbar
- Mehrstufigkeit erfordert Vereinfachung
- Buildings-Library ermöglicht Vereinfachung
- Was jetzt möglich ist:
 - Effiziente Simulation von mehrstufigen Anlagen
 - Bewertung von Materialien im jew. optimalen Betriebspunkt
 - Auslegung und Tuning von Regelkreisen
- Nächste Schritte:
 - Variation der Sorptions-Isotherme um optimalen Verlauf zu finden
 - Materialanforderungen auf Basis einer der Isotherme formulieren

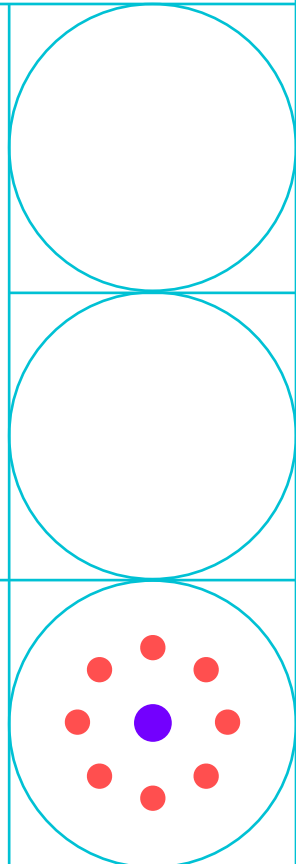
Ende



TUHH
Technische
Universität
Hamburg

Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit!

tuhh.de/itt





1. "17500 Lithium-ion battery 3.6V – 3.7V with a capacity of 1200mAh | akkuteile.de." Accessed: Nov. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.akkuteile.de/en/lithium-ionen-battery/size-17500/keepower/17500-lithium-ion-battery-3-6v-3-7v-with-a-capacity-of-1200mah_100307_3029
2. F. Degen, M. Winter, D. Bendig, and J. Tübke, "Energy consumption of current and future production of lithium-ion and post lithium-ion battery cells," *Nat Energy*, vol. 8, no. 11, pp. 1284–1295, Nov. 2023, doi: [10.1038/s41560-023-01355-z](https://doi.org/10.1038/s41560-023-01355-z).
3. A. Peithman, "What is a Dry Room? A Comprehensive Guide," Allied Cleanrooms. Accessed: Nov. 25, 2024. [Online]. Available: <https://alliedcleanrooms.com/what-is-a-dry-room/>
4. J. Segura Schreiber, "Analysis of Entropy Production Mechanisms in an Adsorption Wheel", Master's Thesis, Technische Universität Hamburg, 25.11.2024
5. Segura Schreiber, Jan, Evgenia Makhova, and Arne Speerforck. 2026. "Understanding Irreversible Processes in a Desiccant Wheel via Direct Entropy Generation Modeling." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 175 (June): 111172. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.111172>.
6. University of California Lawrence Berkeley National Laboratory. 2026. "User Guide — Buildings Library User Guide." Modelica Buildings Library, August 5. <https://simulationresearch.lbl.gov/modelica/userGuide/index.html>.
7. Werner, Herbert. n.d. *Introduction to Control Systems*. Hamburg, Germany. Hamburg University of Technology.
8. Rüter, Christiane. 2026. *Untersuchung der Potenziale für Wärme-Kälte-Kopplung in einer sorptionsgestützten Luftentfeuchtungsanlage*, Projektarbeit (Vorergebnisse). Institut für Technische Thermodynamik, Technische Universität Hamburg.
9. J. Wrobel, P. Morgenstern, G. Schmitz, *Modeling and experimental validation of the desiccant wheel in a hybrid desiccant air conditioning system*, Appl. Therm. Eng. 51 (1) (2013) 1082–1091, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.033>.
10. W. Casas. 2005, *Untersuchung und Optimierung sorptionsgestützter Klimatisierungsprozesse*, 1. Aufl ed., Cuvillier, Göttingen, 2005.
11. Speerforck, Arne. "Investigation of a Desiccant Assisted Geothermal Air Conditioning System." Dr. Hut, 2019. <http://hdl.handle.net/11420/5187>.