

Gebäudeautomation

Klausur vom 22. Juli 2024: Lösungen

Jörn Loviscach

Versionsstand: 23. Juli 2024, 15:59



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Germany License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/> or send a letter to Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, USA.

Anmerkungen sind kursiv geschrieben.

1. Schätzung der CO₂-Produktion im Waggon: $60 \cdot 0,02 \text{ m}^3/\text{h} = 1,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Der Waggon muss $(1000 - 600) \text{ ppm} = 400 \text{ ppm}$ mehr CO₂ bekommen, das sind $400 \cdot 10^{-6} \cdot 150 \text{ m}^3 = 0,06 \text{ m}^3$. Das dauert $\frac{0,06 \text{ m}^3}{1,2 \text{ m}^3/\text{h}} = \frac{1}{20} \text{ h}$, also *erstaunlich kurze* drei Minuten.
2. Zwischen Wänden und Luft besteht ein Temperaturgefälle von 5 K. Durch den Übergangswiderstand fließen damit $\frac{5 \text{ K}}{0,001 \text{ K/W}}$, also 5 kW. *Die Angaben zu den Wärmekapazitäten werden nicht benötigt.*
3. Beim linearen Ventil multipliziert der Hub den K_v -Wert. Bei 50 % Hub und einen Differenzdruck von 1 bar würden also $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ fließen. Wir wollen diesen Volumenstrom auf $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ halbieren. Dazu müssen wir die Druckdifferenz vierteln, denn bei festem Hub ist die Druckdifferenz proportional zum Quadrat des Volumenstroms. Also beträgt die gesuchte Druckdifferenz 0,25 bar.
4. Der Volumenstrom beträgt umgerechnet $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Die theoretische Leistung $P = \dot{V} \cdot \Delta p$ beträgt damit 250 W.
5. *Zum Beispiel so; hier mehr Aspekte als nötig (bewertet werden die ersten drei!):*
 - Ein Digitaler Zwilling kann die Grundlage für das Modell von MPC bilden.
 - Ein Digitaler Zwilling kann benutzt werden, um RL zu trainieren, ohne am echten Gebäude herumzustellen.
 - An Abweichungen des Verhaltens zwischen echtem Gebäude und Digitalem Zwilling kann man Fehlfunktionen, Fehleinstellungen und Fehlbedienungen erkennen.

- Ein Digitaler Zwilling kann manuelle Was-wäre-wenn-Analysen unterstützen, zum Beispiel zum Ausprobieren von Regelstrategien.
6. *Zum Beispiel so; hier mehr Aspekte als nötig (bewertet werden die ersten drei!):*
- Kosten für Hard- und Software: Der Raspberry Pi ist hier die beste Lösung, da er die mit Abstand günstigste Hardware-Option darstellt.
 - Einfache Konfiguration: Der KNX-Controller ist am einfachsten einzurichten, weil er auf Gebäudeautomation zugeschnitten ist.
 - Robustheit: Die SPS sollte am besten gegen elektrische Fehler, Störungen usw. gesichert sein, aber auch der KNX-Controller dürfte hier punkten.
 - Erweiterbarkeit und Flexibilität: Der Raspberry Pi als vollwertiger Computer ist hier die beste Lösung.
 - Nötige Rechenleistung: Alle drei Lösungen haben genügend Rechenleistung für diese Aufgabe.
7. *Zum Beispiel so; hier mehr Aspekte als nötig (bewertet werden die ersten drei!):*
- Hohe Transmissionsverluste: Wenn das Gebäude viel Energie verliert, hat man nachts durch eine geringere Innentemperatur deutlich geringere Verluste.
 - Niedrige Wärmekapazität: Wenn das Gebäude schnell aufzuwärmen ist, ist das Wiederaufheizen am nächsten Morgen schnell.
 - Heizung mit PV-Strom: Man nutzt aus, dass das Gebäude tagsüber gratis Energie erhält.
 - Hohe solare Gewinne: Man nutzt aus, dass das Gebäude tagsüber gratis Energie erhält.
8. Die dem Primärkreis entzogene Wärmeleistung $c\dot{V}_I \cdot (\vartheta_{I,\text{ein}} - \vartheta_{I,\text{aus}})$ muss gleich der dem Sekundärkreis zugeführten Wärmeleistung $c\dot{V}_{II} \cdot (\vartheta_{II,\text{aus}} - \vartheta_{II,\text{ein}})$ sein, wobei c die volumenbezogene Wärmekapazität von Wasser ist. Also:

$$\dot{V}_I \cdot (\vartheta_{I,\text{ein}} - \vartheta_{I,\text{aus}}) = \dot{V}_{II} \cdot (\vartheta_{II,\text{aus}} - \vartheta_{II,\text{ein}}).$$

9. Bestimmung der absoluten Feuchte bei 36 °C und 60 % relativer Feuchte aus dem Mollier-Diagramm: ca. 23 g/kg. Bestimmung der absoluten Feuchte bei 20 °C und Sättigung (*Sättigung würde theoretisch genügen!*) aus dem Mollier-Diagramm: ca. 15 g/kg. Es sind also mindestens 8 g/kg an Wasser zu kondensieren.

Die Luft des Ausgangszustands hat laut Mollier-Diagramm eine Dichte von ca. 1,125 kg/m³, Die stündlichen 10.000 m³ entsprechen damit $10.000 \cdot 1,125 \cdot \frac{1000}{1000+23}$ kg trockener Luft, also ca. 11 t.

Das ergibt pro Stunde mindestens 11 t · 8 g/kg ≈ 90 kg, also 90 L Kondenswasser. *Die Einerstelle dieses Ergebnisses ist unsicher.*

10. Die Fassadenfläche beträgt $4 \cdot 50 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} = 2000 \text{ m}^2$. Das Gebäudevolumen beträgt etwas weniger als $50 \text{ m} \cdot 50 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} = 25.000 \text{ m}^3$, nehmen wir 20.000 m^3 .

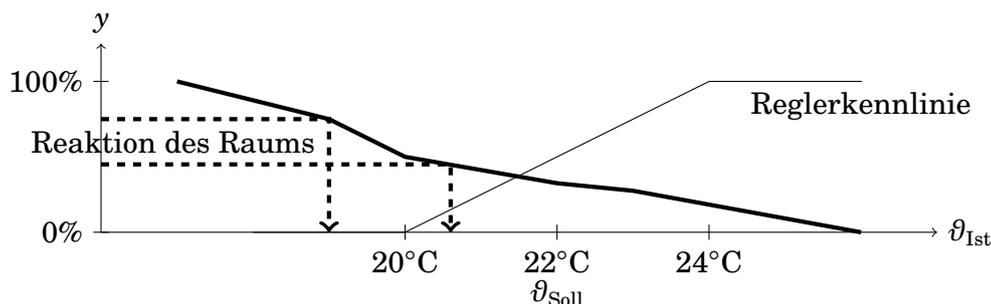
Nehmen wir eine Raumtemperatur von 20°C , eine Außentemperatur von 0°C und eine Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ an. *Oder ähnliche Zahlen. Oder sogar Gradtagzahlen; daraus den Jahresverbrauch statt eines momentanen Wärmestroms bestimmen.* Der Volumenstrom der Lüftung beträgt dann $0,5 \text{ h}^{-1} \cdot 20.000 \text{ m}^3 = 10.000 \text{ m}^3/\text{h} \approx 3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der Austausch der Fenster verringert den Wärmestrom um $(2,8 - 0,8) \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot 0,3 \cdot 2000 \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ K} = 24 \text{ kW}$.

Die Installation der Wärmerückgewinnung verringert die benötigte Wärmeleistung um etwa $3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,0 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \cdot 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot 0,7 \cdot 20 \text{ K} \approx 50 \text{ kW}$. *Wärmekapazität und Dichte stammen aus dem Mollier-Diagramm. Und wir multiplizieren schlichtweg mit 0,7, weil der Unterschied zwischen Ablufttemperatur und Zulufttemperatur angesichts der niedrigen Außenlufttemperatur gering ist, so dass die Wärmerückgewinnung das 0,7-Fache der nötigen Lufterwärmung liefert.*

Mit den gemachten Annahmen verringert die Wärmerückgewinnung den Heizbedarf also stärker. *Wir haben allerdings Nachtabsenkung, Wärmekapazität und vieles andere vernachlässigt.*

11. *Zum Beispiel diese Kurve; Hauptsache, streng monoton fallend, über den gesamten Bereich von y verlaufend, aber nicht darüber hinaus:*



Wenn der Regler stabil ist, stellt sich der Schnittpunkt beider Kurven als Gleichgewicht ein. Dieser Schnittpunkt liegt, wie man an diesem Diagramm sieht, allenfalls zufällig bei der Solltemperatur, so dass eine Regelabweichung bleibt. *Allerdings wird, wie man ebenfalls an diesem Diagramm sieht, die Solltemperatur umso genauer getroffen, je steiler die Reglerkennlinie ist,*

12. *Zum Beispiel so; hier mehr Aspekte als nötig (bewertet werden die ersten drei!):*

- Die Nutzung externen Stroms sollte man positiv in die zu *minimierende* (!) Zielfunktion einrechnen, weil er oft umweltschädlicher erzeugt ist als der lokale.
- Die Abnutzung des Batteriespeichers durch (starke) Lade-/Entladezyklen sollte man positiv (*siehe den ersten Punkt!*) einrechnen.
- Die Abnutzung der Wärmepumpe durch häufiges Schalten sollte man positiv (*siehe den ersten Punkt!*) einrechnen.

- Eine Lärmbelastung durch die Wärmepumpe in den Ruhezeiten (Nacht, Mittag, Wochenende) könnte man positiv (*siehe den ersten Punkt!*) einrechnen.

Solare Gewinne werden nicht über die Zielfunktion optimiert, sondern gehen bloß in die Energiebilanz des Modells ein, das dann eingesparte Heizleistung, erhöhte Kühlleistung oder die bei geschlossenen Jalousien nötige künstliche Beleuchtung ermittelt. Der so erhöhte oder verringerte Energiebedarf wird dann in der Zielfunktion berücksichtigt.

Die Nutzung von PV-Strom könnte man negativ (also als vorteilhaft) für die Umwelt einrechnen, aber der wird sowieso genutzt – notfalls im externen Netz, falls nicht gerade wegen Netzengpass abgeregelt wird.