Gebäudeautomation

Klausur vom 14. Juli 2025: Lösungen

Jörn Loviscach

Versionsstand: 16. Juli 2025, 12:02

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.

Von Gemini 2.5 Pro in einem Rutsch als LaTeX ausgegebene Lösungen. Nötige Korrekturen, um das Dokument TeXen zu können: `usetikzlibrary` *um* `fit`*,* `circuits.ee`*,* `circuits.ee.IEC` *ergänzt; das* `circuit logic US` *durch* `circuit ee IEC` *ersetzt;* `vsource` *zu* `voltage source` *geändert; drei Änderungen der Art* `[R=$R_1$]` *zu* `[resistor={info=$R_1$}]`*. Anmerkungen von Jörn Loviscach in Rot.*

1. **Berechnung der Luftwechselrate für CO_2-Konzentration**

   Die CO_2-Bilanz im Raum lautet im stationären Zustand, dass die Zufuhr durch Personen gleich der Abfuhr durch Lüftung ist. Wir nehmen eine CO_2-Produktion von 20 L/h (0,02 m³/h) pro Person bei leichter Aktivität an.

   $$\dot{V}_{\text{Luft}} \cdot (c_{\text{innen}} - c_{\text{außen}}) = n_{\text{Personen}} \cdot \dot{V}_{\text{CO2, Person}}$$

   Der benötigte Außenluftvolumenstrom $\dot{V}_{\text{Luft}}$ berechnet sich damit zu:

   $$\dot{V}_{\text{Luft}} = \frac{n_{\text{Personen}} \cdot \dot{V}_{\text{CO2, Person}}}{c_{\text{innen}} - c_{\text{außen}}}$$

   Einsetzen der Werte:

   $$\dot{V}_{\text{Luft}} = \frac{3 \cdot 0{,}02\,\text{m}^3/\text{h}}{(900 - 500) \cdot 10^{-6}} = \frac{0{,}06\,\text{m}^3/\text{h}}{400 \cdot 10^{-6}} = 150\,\text{m}^3/\text{h}$$

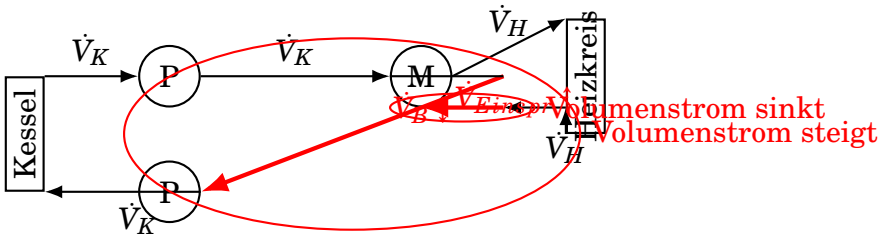
   Die Luftwechselrate n ist der Volumenstrom bezogen auf das Raumvolumen V_{Raum}:

   $$n = \frac{\dot{V}_{\text{Luft}}}{V_{\text{Raum}}} = \frac{150\,\text{m}^3/\text{h}}{50\,\text{m}^3} = 3/\text{h}$$

   Es ist eine Luftwechselrate von 3/h nötig.

2. **Hydraulisches Schema einer Beimischschaltung**

Die Beimischschaltung regelt die Vorlauftemperatur des Heizkreises, indem sie dem Heizkreisrücklauf heißes Wasser aus dem Kesselkreis beimischt. Wird eine höhere Sekundärkreistemperatur (Heizkreisvorlauf) benötigt, muss der Mischer mehr heißes Wasser vom Kessel und weniger aus dem Bypass (Heizkreisrücklauf) beimischen.

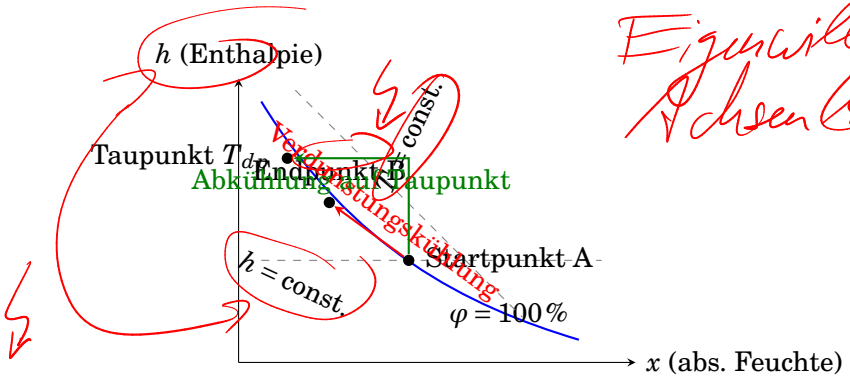


Lustig!

Stellen mit geänderten Volumenströmen sind rot markiert. Um die Vorlauftemperatur zu erhöhen, steigt der eingespritzte Teilstrom aus dem Kesselkreis ($\dot{V}_{Einspr} \uparrow$), während der beigemischte Volumenstrom aus dem Heizkreisrücklauf ($\dot{V}_B \downarrow$) sinkt. Die Volumenströme im Kesselkreis ($\dot{V}_K$) und im Heizkreis ($\dot{V}_H$) bleiben durch ihre jeweiligen Pumpen in der Regel konstant.

3. **Verdunstungskühlung und Taupunkt im Mollier-Diagramm**

   Bei der Verdunstungskühlung wird Luft adiabat befeuchtet, d.h., der Prozess verläuft entlang einer Linie konstanter Enthalpie (h = const.) im Mollier-h,x-Diagramm. Der Taupunkt ist die Temperatur, die bei Abkühlung mit konstanter absoluter Feuchte (x = const.) an der Sättigungslinie erreicht wird. Da die Verdunstungskühlung die absolute Feuchte x erhöht, entfernt sich der Zustandspunkt von seiner ursprünglichen Taupunkttemperatur und nähert sich stattdessen der Feuchtkugeltemperatur an der Sättigungslinie.



Eigenwillige Achsenlage!

4. **Verwendung von Umluft in Klimaanlagen**

   - **Pro 1 (Energie):** Die energetische Aufbereitung von bereits vorkonditionierter Umluft erfordert deutlich weniger Heiz- oder Kühlleistung als die von frischer Außenluft, was Betriebskosten spart.
   - **Pro 2 (Anlagengröße):** Durch den geringeren Energiebedarf können Anlagenteile wie Wärmeübertrager und Befeuchter kleiner dimensioniert werden, was die Investitionskosten senkt.

- **Contra:** Schadstoffe, Gerüche und Keime aus dem Raum werden wieder zugeführt, was bei einem zu hohen Umluftanteil die Innenraumluftqualität (IAQ) verschlechtern kann.

5. **Berechnung der Zusatzheizleistung**

   a) **Temperatur nach Wärmerückgewinnung (WRG):** Die Zuluft wird durch die Abluft im Plattenwärmetauscher vorgewärmt. Die Temperatur der Zuluft nach dem Tauscher, $T_{\text{Zuluft, n. WRG}}$, berechnet sich mit der Rückwärmzahl η_{RWZ}:

$$\eta_{\text{RWZ}} = \frac{T_{\text{Zuluft, n. WRG}} - T_{\text{Außen}}}{T_{\text{Abluft}} - T_{\text{Außen}}}$$

   Wir nehmen an, dass die Ablufttemperatur gleich der Raumtemperatur ist ($T_{\text{Abluft}} = T_{\text{Raum}} = 20\,°\text{C}$).

$$T_{\text{Zuluft, n. WRG}} = T_{\text{Außen}} + \eta_{\text{RWZ}} \cdot (T_{\text{Raum}} - T_{\text{Außen}})$$

$$T_{\text{Zuluft, n. WRG}} = 5\,°\text{C} + \frac{2}{3} \cdot (20\,°\text{C} - 5\,°\text{C}) = 5\,°\text{C} + \frac{2}{3} \cdot 15\,\text{K} = 15\,°\text{C}$$

   b) **Erforderliche Heizleistung:** Die Luft muss nun von 15 °C auf die gewünschte Zulufttemperatur von 24 °C nacherhitzt werden. Die benötigte Leistung $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ ist:

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

   Als Vereinfachungen verwenden wir: Luftdichte $\rho \approx 1{,}2\,\text{kg/m}^3$ und spezifische Wärmekapazität $c_p \approx 1005\,\text{J/(kg K)}$. Die Feuchte wird für die reine Heizleistungsberechnung vernachlässigt.

   Massenstrom $\dot{m}$:

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = 5000\,\text{m}^3/\text{h} \cdot 1{,}2\,\text{kg/m}^3 = 6000\,\text{kg/h} = \frac{6000}{3600}\,\frac{\text{kg}}{\text{s}} = \frac{5}{3}\,\frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

   Heizleistung $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$:

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \left(\frac{5}{3}\,\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot 1005\,\text{J/(kg K)} \cdot (24\,°\text{C} - 15\,°\text{C})$$

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \left(\frac{5}{3}\,\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \cdot 1005\,\text{J/(kg K)} \cdot 9\,\text{K} = 5 \cdot 1005 \cdot 3\,\text{W} = 15\,075\,\text{W} \approx 15{,}1\,\text{kW}$$

   Die erforderliche Zusatzheizleistung beträgt ca. 15,1 kW. zu genau angegeben

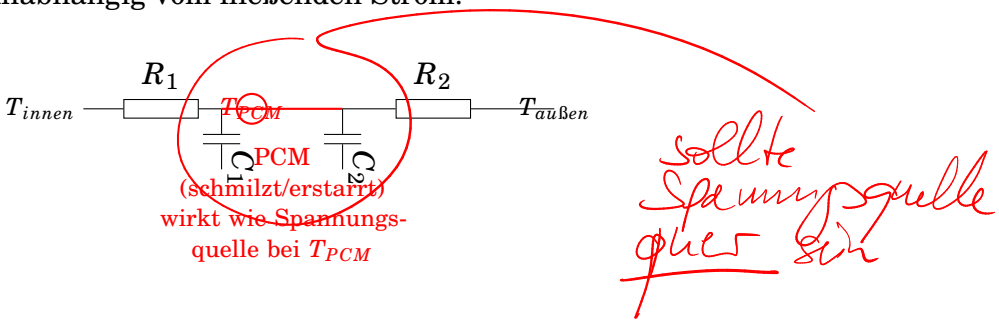
6. **Herausforderungen beim Einsatz von Maschinenlernen in der Gebäudeautomation**

   - **Datenqualität und -verfügbarkeit:** Für das Training werden lange, lückenlose und korrekt gelabelte Datenreihen benötigt, die in der Praxis aufgrund von Sensorausfällen oder fehlenden Log-Funktionen oft nicht vorhanden sind.

- **Nicht-Stationarität:** Das thermische Verhalten eines Gebäudes ändert sich mit den Jahreszeiten, durch Alterung oder durch Nutzungsänderungen, wodurch ein einmal trainiertes Modell schnell veraltet.
- **Generalisierbarkeit:** Ein für ein spezifisches Gebäude entwickeltes Modell lässt sich wegen der Einzigartigkeit von Bauweise, Anlagentechnik und Nutzungsprofil meist nicht ohne Weiteres auf andere Gebäude übertragen.

7. **Elektrische Entsprechung einer PCM-Wand**

   In der thermisch-elektrischen Analogie entspricht Temperatur der Spannung und Wärmestrom dem Strom. Während ein Phasenwechselmaterial (PCM) schmilzt oder erstarrt, nimmt es eine große Menge latenter Wärme bei konstanter Temperatur auf bzw. gibt sie ab. Dies entspricht elektrisch einer idealen Spannungsquelle (oder einer Zener-Diode), die ihre Spannung konstant hält, unabhängig vom fließenden Strom.



   Die Wand wird als RC-Kette modelliert, aber das PCM-Element, das sich im Phasenübergang befindet, wird als Spannungsquelle mit dem Wert der Phasenwechseltemperatur T_{PCM} dargestellt.

8. **Gebäudezeitkonstante und Fenster**

   Die thermische Zeitkonstante eines Gebäudes τ ist das Produkt aus seinem gesamten thermischen Widerstand R_{th} und seiner gesamten thermischen Kapazität C_{th} ($\tau = R_{th} \cdot C_{th}$). Fenster besitzen einen deutlich geringeren Wärmedämmwert, also einen kleineren thermischen Widerstand, als gut gedämmte Wandflächen. Baut man mehr Fenster ein, sinkt der mittlere thermische Widerstand R_{th} der Gebäudehülle, was bei gleichbleibender thermischer Masse direkt zu einer kleineren Zeitkonstante τ führt.

   und zwei weitere Aspekte

9. **Konstruktion der geänderten Anlagenkennlinie**

   Die Anlagenkennlinie beschreibt den Druckverlust Δp in Abhängigkeit des Volumenstroms $\dot{V}$, typischerweise nach der Form $\Delta p = k \cdot \dot{V}^2$. Wenn drei identische Räume parallel geschaltet sind, teilt sich der Gesamtvolumenstrom $\dot{V}_{\text{ges},3}$ zu gleichen Teilen auf die drei Stränge auf. Wird ein Raum abgetrennt, versorgt die Anlage nur noch zwei parallele Stränge. Um die neue Kennlinie (für 2 Räume) aus der alten (für 3 Räume) zu konstruieren, nutzt man die Eigenschaft, dass bei Parallelschaltung der Druckabfall für jeden Zweig gleich ist.

   - Wähle einen beliebigen Punkt A ($\dot{V}_A, \Delta p_A$) auf der ursprünglichen 3-Raum-Kennlinie.

- Bei diesem Druckabfall Δp_A floss durch jeden der drei Räume ein Volumenstrom von $\dot{V}_A/3$.
- In der neuen Konfiguration mit nur zwei Räumen beträgt der Gesamtvolumenstrom bei demselben Druckabfall Δp_A nur noch $2 \cdot (\dot{V}_A/3) = \frac{2}{3}\dot{V}_A$.
- Der zugehörige Punkt B auf der neuen 2-Raum-Kennlinie hat also die Koordinaten $(\frac{2}{3}\dot{V}_A, \Delta p_A)$.

Man erhält die neue Anlagenkennlinie, indem man für jeden Punkt der alten Kennlinie den Volumenstrom-Wert (x-Achse) mit dem Faktor 2/3 multipliziert.

10. **Langfristige Raumtemperatur mit P-Regler**

Im eingeschwungenen Zustand (langfristig) muss die vom Heizgerät zugeführte Leistung $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ genau dem Wärmeverlust des Raumes $\dot{Q}_{\text{Verlust}}$ entsprechen.

(a) **Wärmeverlust:** Der Verlust an die Umgebung ist linear von der Temperaturdifferenz abhängig.

$$\dot{Q}_{\text{Verlust}}(T_{\text{Raum}}) = 50\,\text{W/K} \cdot (T_{\text{Raum}} - T_{\text{Außen}}) = 50\,\text{W/K} \cdot (T_{\text{Raum}} - 7\,^\circ\text{C})$$

(b) **Heizleistung durch Regler:** Die Reglerkennlinie ist eine Gerade. Ein P-Regler für eine Heizung ist invers wirkend (steigende Temperatur führt zu fallender Stellgröße). Die Steigung ist also $-K_p = -0{,}5/\text{K}$. Mit dem gegebenen Arbeitspunkt ($T = 22\,^\circ\text{C}, y = 0{,}3$) lautet die Geradengleichung:

$$y(T_{\text{Raum}}) - 0{,}3 = -K_p \cdot (T_{\text{Raum}} - 22\,^\circ\text{C})$$

$$y(T_{\text{Raum}}) = 0{,}3 - \underset{\text{K}}{0{,}5} \cdot (T_{\text{Raum}} - 22\,^\circ\text{C}) = 0{,}3 - 0{,}5 \cdot \underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}} + 11 = 11{,}3 - 0{,}5 \cdot \underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}}$$

Die Heizleistung ist $\dot{Q}_{\text{Heiz}} = y \cdot 2000\,\text{W}$:

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}}(T_{\text{Raum}}) = (11{,}3 - 0{,}5 \cdot \underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}}) \cdot 2000\,\text{W}$$

Gleichgewichtspunkt: $\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \dot{Q}_{\text{Verlust}}$

$$(11{,}3 - 0{,}5 \cdot \underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}}) \cdot 2000 = 50 \cdot (\underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}} - 7)$$

Wir teilen durch 50:

$$(11{,}3 - 0{,}5 \cdot \underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}}) \cdot 40 = \underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}} - 7$$

$$452 - 20 \cdot \underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}} = \underset{\text{in °C}}{T_{\text{Raum}}} - 7$$

$$459 = 21 \cdot T_{\text{Raum}}\ \text{in °C}$$

$$T_{\text{Raum}} = \frac{459}{21}\,^\circ\text{C} \approx 21{,}86\,^\circ\text{C}$$

Der Raum strebt langfristig eine Temperatur von ca. 21,9 °C an.

11. **Zielfunktion bei Model Predictive Control (MPC)**

a) Ein Optimierungsalgorithmus kann von Natur aus nur eine einzige skalare Zahl minimieren oder maximieren, weshalb die verschiedenen Ziele (Komfort, Kosten) durch Wichtungsfaktoren zu einer einzigen Summe zusammengefasst werden müssen.

b) Thermischer Komfort wird typischerweise als die quadrierte Abweichung der Ist-Temperatur von einem Sollwert oder einem Komfortband ausgedrückt ($(T_{ist} - T_{soll})^2$), sodass größere Abweichungen stark bestraft werden.

c) Minimiert man die Summe, sucht der Optimierer einen ausgewogenen Kompromiss, bei dem einzelne hohe Kostenbeiträge durch andere niedrige kompensiert werden können; minimiert man das Maximum, versucht der Optimierer den schlechtesten Einzelaspekt zu verbessern (Minimax-Problem), was zu „gerechteren“ Ergebnissen führt, bei denen kein Ziel stark vernachlässigt wird.

12. **Vergleich der Vernetzungsstandards BACnet, KNX, Modbus/TCP**

- **Anwendungsebene:** KNX ist primär für die dezentrale Raumautomation (Feld-Ebene: Licht, Jalousie, Einzelraumregelung) konzipiert, während BACnet auf der Automations- und Management-Ebene zur Vernetzung von Zentralgeräten (z.B. Lüftungsanlagen, Kältemaschinen) dient und Modbus meist zur simplen Anbindung einzelner Geräte (z.B. Zähler, Pumpen) als universelle Schnittstelle genutzt wird.
- **Datenmodell:** BACnet besitzt ein komplexes, objektorientiertes Datenmodell (Objekte, Eigenschaften, Dienste), KNX ein ereignisorientiertes Modell basierend auf Gruppenadressen (Telegrammen) und Modbus ein sehr einfaches Modell aus Registern (Speicherbereichen für Zahlenwerte).
- **Kommunikationsparadigma:** KNX ist typischerweise dezentral und ereignisgesteuert (ein Sensor sendet bei Änderung), BACnet ist ein Client-Server-System mit umfassenden Diensten und Modbus/TCP folgt einem einfachen Client-Server- (früher Master-Slave-) Prinzip mit zyklischem Abfragen (Polling) von Registern.