

SimQuality - Validierung von Modellen zur thermischen Konditionierung

IBK, TU Dresden

19. Juli 2022

Zusammenfassung

Für die Berechnung der korrekten Wärmebilanz des Raumluftknotens ist die richtige Abbildung von thermischen Konditionierungskomponenten im Raum notwendig. Der nachfolgend beschriebene Testfall prüft die Funktionalität eines Modells bzw. die Modellimplementierung/Software hinsichtlich der Bestimmung der Wärmebilanzen von Konditionierungssystemen.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Gleichungen	2
2	Aufgabenstellung	2
2.1	Geometrie	2
2.2	Konstruktion	2
2.3	Wetter	3
2.3.1	Klima A	3
2.4	Modellparameter	4
2.4.1	Opake Bauteile/Elemente	4
2.4.2	Flächenkonditionierungssystem	4
2.4.3	Transparente Bauteile	4
2.4.4	Anfangsbedingung	4
2.4.5	Lüftung	4
2.4.6	Übergangskoeffizienten	5
2.5	Wärmeverteilung im Innenraum	5
2.6	Prüfvarianten	5
2.6.1	Prüfvariante 1 (10.1) - Ideale (Luft-)Konditionierung	5
2.6.2	Prüfvariante 2 (10.2) - Fußbodenheizung und -kühlung mit konvektiver Wärmeübertragung	6
2.6.3	Prüfvariante 3 (10.3) - Fußbodenheizung und -kühlung mit radiativer Wärmeübertragung	6
2.6.4	Prüfvariante 4 (10.4) - Fußbodenheizung mit konvektiver Wärmeübertragung Realklima .	7
2.6.5	Prüfvariante 5 (10.5) - Fußbodenheizung mit radiativer Wärmeübertragung Realklima . .	8
2.6.6	Prüfvariante 6 (10.6) - Fußbodenkühlung mit radiativer Kälteübertragung Realklima . . .	8
3	Geforderte Ergebnisse	10
3.1	Regeln für die Berechnung	10
3.2	Ergebnisdatenablage	10
4	Auswertung	10

1 Grundlegende Gleichungen

Die Gleichungen für die Modellierung von Konditionierungssystemen sind in folgender Literatur zusammengestellt. Es wird darauf hingewiesen, da zum Teil unterschiedliche Konventionen bzw. Definitionen für Begriffe und Größen verwendet werden.

- Feist, Wolfgang: „Thermische Gebäudesimulation“; Karlsruhe 1994
- Nicolai, Andreas: „Physikalische Grundlagen des thermischen Raummodells THERAKLES“; Dresden 2013, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-102112>

Referenzierte Testfälle

2 Aufgabenstellung

2.1 Geometrie

Die Geometrie lehnt sich an ? an. Folgende Parameter werden für die Geometrie definiert:

- Innenmaße ($B \times L \times H$) des Raumes betragen somit $2\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$
- Luftvolumen beträgt $V = 30\text{ m}^3$
- Die Wärmekapazität der Luft wird berücksichtigt

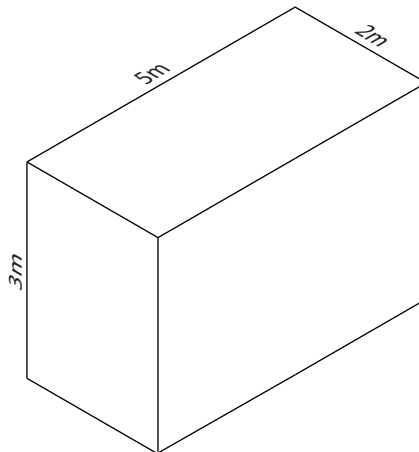


Abbildung 2.1: Abbildung des Testraumes mit Bemaßung

2.2 Konstruktion

Die zu verwendende Konstruktion entstammt Testfall 03 „Validierung der Wärmeleitung durch opake Elemente“ und wird in Tab. 2.1 dargelegt.

Tabelle 2.1: Merkmale der Bauteile für die Prüfung der Konstruktion 4

Schicht Nr	Material	Dicke d m	Wärmeleitfähigkeit λ $\frac{W}{m \cdot K}$	Dichte ρ $\frac{kg}{m^3}$	Spezifische Wärmekapazität c $\frac{J}{kg \cdot K}$
innen - $h_c = 2.5 \frac{W}{m^2 K}$					
1	SimQ_Beton	0.200	1.20	2000	1000
2	SimQ_Dämmung	0.100	0.04	50	1000
3	SimQ_Putz	0.005	0.14	800	1500
außen - $h_c = 8 \frac{W}{m^2 K}$					

2.3 Wetter

Für diesen Testfall werden drei unterschiedliche Klimadatensätze genutzt:

- Klima A (generiertes Klima ohne Strahlung mit schwingender Außentemperatur)
SIMQ_TF10_KlimaA.epw
- Klima B (reales Klima ohne Strahlung)
SIMQ_TF10_KlimaB.epw
- Madrid (reales, warmes Klima)
Madrid.epw

2.3.1 Klima A

Das Klima A bildet verschiedene Heiz- und Kühlperioden ab. Dabei wird das Klima in folgende Perioden aufgeteilt:

Tabelle 2.2: Klimaabschnitte Klima A

Perioden	Beginn	Ende	Temperatur [°C]
Einschwingen	01.01. 00:00	31.01. 23:00	konst. 20
Übergang zur Heizperiode	31.01. 23:00	02.02. 05:00	lineare Verlauf von 20 auf -10
Heizperiode	02.02. 05:00	30.04. 00:00	konst. -10
Übergang zur Einschwingperiode	30.04. 00:00	30.04. 20:00	lineare Verlauf von -10 auf 10
Einschwingperiode	30.04. 20:00	29.06. 23:00	konst. 10
Übergang zur Kühlperiode	29.06. 23:00	01.07. 05:00	lineare Verlauf von 10 auf 40
Kühlperiode	01.07. 05:00	29.08. 23:00	konst. 40
Übergang Einschwingperiode	29.08. 23:00	30.08. 19:00	lineare Verlauf von 40 auf 20
Einschwingperiode	30.08. 19:00	28.09. 23:00	konst. 20
Übergang Einschwingperiode	28.09. 23:00	29.09. 19:00	lineare Verlauf von 20 auf 0
Einschwingperiode	29.09. 19:00	13.10. 23:00	konst. 0
Übergang Einschwingperiode	13.10. 23:00	14.10. 09:00	lineare Verlauf von 0 auf 10
Einschwingperiode	14.10. 09:00	30.10. 23:00	konst. 10
Übergang Heizperiode	30.10. 23:00	31.10. 19:00	lineare Verlauf von 10 auf -10
Heizperiode	31.10. 19:00	31.12. 23:00	konst. -10

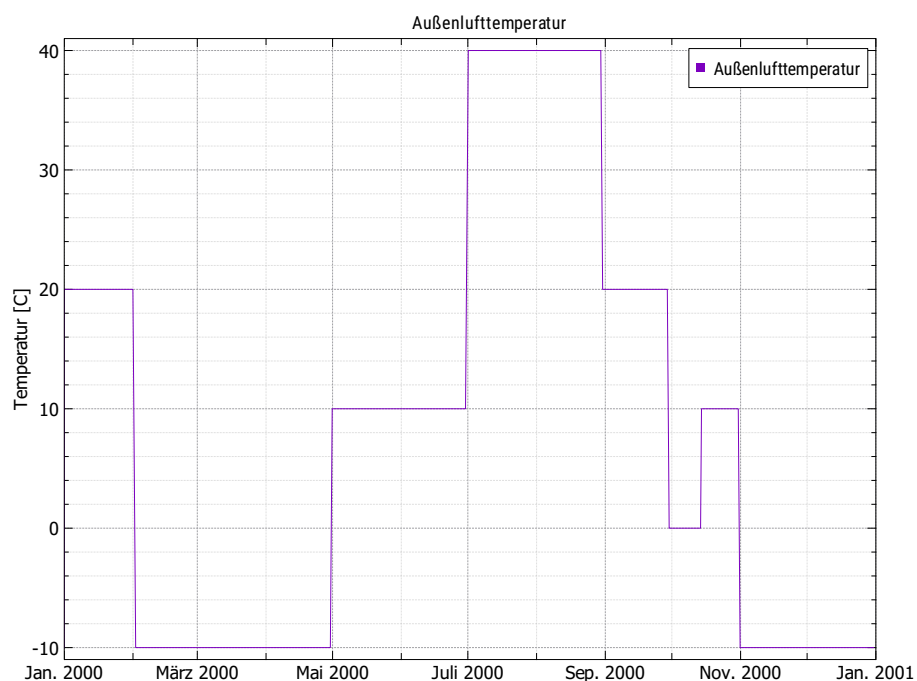


Abbildung 2.2: Außenlufttemperatur Klima A

2.4 Modellparameter

2.4.1 Opaque Bauteile/Elemente

Alle Elemente, einschließlich Decke und Fußboden, sind identisch (gleiche Materialparameter und Schichtenfolge) und weisen die gleichen Randbedingungen auf, siehe Tabelle 2.1.

2.4.2 Flächenkonditionierungssystem

In verschiedenen Prüfvarianten wird eine Flächenkonditionierung verwendet. Die Modelle dafür sind folgende Eigenschaften zu parametrieren:

Das Konditionierungssystem wird in die erste Materialschicht (SimQ_Beton) eingepflegt. Dazu wird diese Schicht in drei Schichten (Aufbau beginnend von innen (Innenraumkontakt) nach außen (Dämmschicht)) aufgeteilt. Schichtfolge:

- 5 cm SimQ_Beton mit Kontakt zur Innenraumluft
- 2 cm SimQ_Beton mit Integration des Konditionierungssystems
- 13 cm SimQ_Beton mit Kontakt zur Dämmschicht

Innerhalb der Schicht soll eine homogene Temperatur (annähernd der Vorlauftemperatur) herrschen. Folgende Parameter sind für die realen Konditionierungssysteme anzusetzen:

- Vorlauftemperatur entspricht der jeweiligen Angabe der Prüfvariante
- Massestrom 0.2 kg/s
- Rohrrinnendurchmesser 16 mm
- Rohrwanddicke 2 mm daraus ergibt sich ein Rohraußendurchmesser von 20 mm
- Rohrwandmaterial
 - Dichte 960 kg/m^3
 - spez. Wärmekapazität $1900 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
 - Wärmeleitfähigkeit $0.42 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
- Rohrabstand 10 cm
- Rohrlänge 100 m
- Fluid ist Wasser mit folgenden Eigenschaften
 - Dichte 1000 kg/m^3
 - spez. Wärmekapazität $4180 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
 - Wärmeleitfähigkeit $0.556 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
 - keine Berücksichtigung von Temperaturabhängigkeiten
- Druckverluste im Rohr werden nicht berücksichtigt

2.4.3 Transparente Bauteile

Keine Transparenten Bauteile vorhanden.

2.4.4 Anfangsbedingung

Alle Elemente, einschließlich Decke und Fußboden sind identisch und weisen die gleichen Randbedingungen auf. Die Initialtemperatur aller Bauteile und der Raumluft beträgt $T_{\text{initial}} = 20^\circ\text{C}$ zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ h}$.

Anmerkung: Die Wetterdateien sind dahingehend angepasst, dass die Außenlufttemperatur bis zum 1. Februar konstant auf $T_{\text{out}} = 20^\circ\text{C}$ gesetzt sind und damit alle Programme im eingeschwungenen Zustand sein müssen.

2.4.5 Lüftung

Der Luftvolumenstrom mit der Außenluft wird mit konstant null angesetzt (kein Luftwechsel).

2.4.6 Übergangskoeffizienten

Für die Wärmeübertragungsrandbedingungen sind folgende Modellparameter zu wählen:

- Der Absorptionskoeffizient der Außenflächen wird auf $a = 0$ gesetzt (die komplette kurzwellige Strahlung wird reflektiert).
- Der Absorptionskoeffizient der Innenflächen wird auf $a = 1$ gesetzt (die komplette kurzwellige Strahlung wird absorbiert).
- Die Emissionsgrade der Innen- und Außenflächen jedes Elementes, einschließlich Decke und Fußboden, werden mit null angesetzt (die Wärmeübertragung durch langwellige Strahlung an die Innen- und Außenflächen wird mit null angesetzt), soweit nicht anders beschrieben.
- Der innere Konvektionswärmeübergangskoeffizient jedes Elementes, einschließlich Decke und Fußboden beträgt: $h_{c,i} = 2.5 \frac{W}{m^2 K}$
- Der äußere Konvektionswärmeübergangskoeffizient jedes Elementes, einschließlich Decke und Fußboden beträgt: $h_{c,e} = 8 \frac{W}{m^2 K}$

Anmerkung: In Programmen, in denen der äußere Wärmeübergangskoeffizient nicht als fester Wert angegeben werden kann und z.B. aus der Windgeschwindigkeit berechnet wird, kann man über Anpassung der Windgeschwindigkeit im Klimadatensatz den Übergangskoeffizienten einstellen.

2.5 Wärmeverteilung im Innenraum

Andere Ansätze sind vom Anwender zu dokumentieren.

2.6 Prüfvarianten

Es werden sechs verschiedene Prüfvarianten angegeben.

2.6.1 Prüfvariante 1 (10.1) - Ideale (Luft-)Konditionierung

In dieser Prüfvariante wird der Raum durch eine reine Konvektionsheizung beziehungsweise -kühlung konditioniert. Dabei werden folgende Zeitpläne für die Raumsolltemperaturen von Heizung und Kühlung (Tab. 2.3) zugrunde gelegt. Ein langwelliger Strahlungsaustausch der Innenoberflächen wird nicht berücksichtigt.

Die maximale Heizleistung wird auf 500 W und die maximale Kühlleistung auf 300 W begrenzt. Das KlimaA (siehe Wetterdatei `SIMQ_TF10_KlimaA.epw`) ist für diese Prüfvariante zu benutzen.

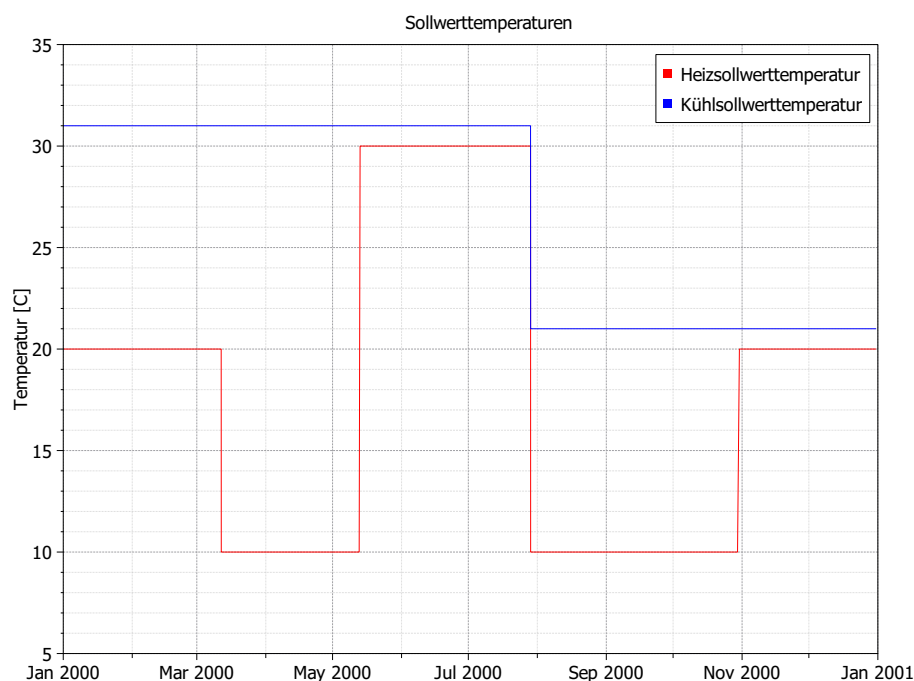


Abbildung 2.3: Heiz- und Kühlsollwerttemperaturen für Testfall 10.1

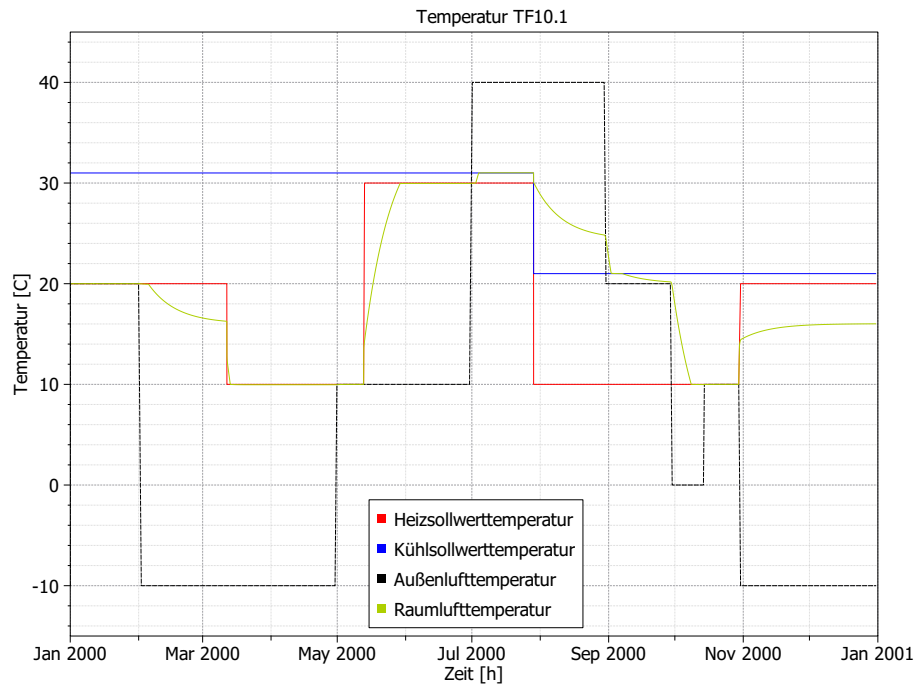


Abbildung 2.4: Temperaturen für Testfall 10.1

Tabelle 2.3: Heiz- und Kühlsolltemperaturen

Beginn	Ende	Heizsolltemperatur [°C]	Kühlsolltemperatur [°C]	Interval [h]
01.01. 00:00	12.03. 23:00	konst. 20	konst. 31	1703
12.03. 23:00	13.03. 00:00	lineare Verlauf von 20 auf 10	konst. 31	1
13.03. 00:00	13.05. 23:00	konst. 10	konst. 31	1487
13.05. 23:00	14.05. 09:00	lineare Verlauf von 10 auf 30	konst. 31	10
14.05. 09:00	29.07. 23:00	konst. 30	konst. 31	1838
29.07. 23:00	30.07. 00:00	lineare Verlauf von 30 auf 10	lineare Verlauf von 31 auf 21	1
30.07. 00:00	30.10. 23:00	konst. 10	konst. 21	2231
30.10. 23:00	31.10. 19:00	linearer Verlauf von 10 auf 20	konst. 21	20
31.10. 19:00	31.12. 23:00	konst. 20	konst. 21	1469

2.6.2 Prüfvariante 2 (10.2) - Fußbodenheizung und -kühlung mit konvektiver Wärmeübertragung

Im Fußboden wird eine Schicht mit einem detaillierten Modell zur Flächenkonditionierung integriert. Alle Parameter sind Abschnitt 2.4.2 zu entnehmen. Ein langwelliger Strahlungsaustausch durch Innenflächen wird nicht berücksichtigt. Die Vorlauftemperatur wird durch die nachfolgende Tabelle 2.4 vorgegeben.

Zusätzlich wird der Übergangskoeffizient auf der Innenseite des Fußbodens auf $h_{c,i} = 10 \frac{W}{m^2 K}$ angepasst. Das KlimaA (siehe Wetterdatei SIMQ_TF10_KlimaA.epw) ist für diese Prüfvariante zu benutzen.

2.6.3 Prüfvariante 3 (10.3) - Fußbodenheizung und -kühlung mit radiativer Wärmeübertragung

Alle Parameter aus der Prüfvariante 10.2 sind zu übernehmen. Der langwellige Strahlungsaustausch der Innenoberflächen erfolgt mittels der aufgelisteten Parameter:

- Der Emissionskoeffizient aller Innenflächen wird auf $\varepsilon = 1$ gesetzt (die komplette langwellige Strahlung wird absorbiert/emittiert).

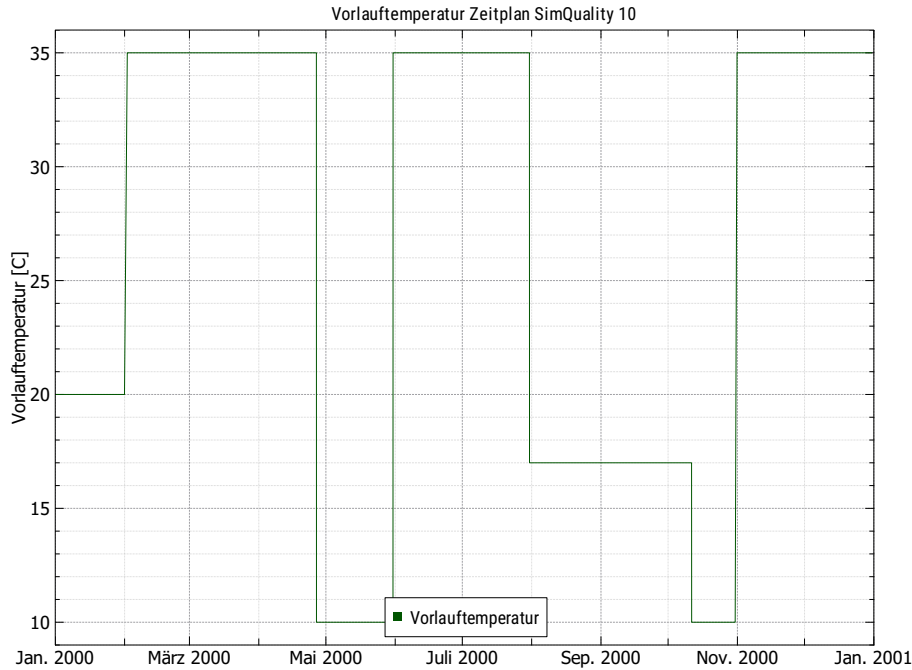


Abbildung 2.5: Vorlauftemperaturen für Testfall 10.2

Tabelle 2.4: Vorlauftemperatur Prüfvariante 10.2

Beginn	Ende	Vorlauftemperatur [°C]	Interval [h]
01.01. 00:00	31.01. 23:00	konst. 20	743
31.01. 23:00	02.02. 05:00	linearer Verlauf von 20 auf 35	30
02.02. 05:00	25.04. 18:00	konst. 35	1981
25.04. 18:00	25.04. 19:00	lineare Verlauf von 35 auf 10	1
25.04. 19:00	30.05. 00:00	konst. 10	821
30.05. 00:00	30.05. 01:00	lineare Verlauf von 10 auf 35	1
30.05. 01:00	30.07. 00:00	konst. 35	1463
30.07. 00:00	30.07. 01:00	lineare Verlauf von 35 auf 17	1
30.07. 01:00	10.10. 12:00	konst. 17	1739
10.10. 12:00	10.10. 13:00	lineare Verlauf von 17 auf 10	1
10.10. 13:00	30.10. 23:00	konst. 10	490
30.10. 23:00	31.10. 19:00	linearer Verlauf von 10 auf 35	20
31.10. 19:00	31.12. 23:00	konst. 35	1469

2.6.4 Prüfvariante 4 (10.4) - Fußbodenheizung mit konvektiver Wärmeübertragung Realklima

Die Vorlage für diese Prüfvariante bildet die Prüfvariante 10.2. Ausgetauscht wird das Klima A gegen das Klima B (siehe Wetterdatei `SIMQ_TF10_KlimaB.epw`). Zudem wird ein Thermostatventil eingeführt. Die Regelung des Thermostatventils erfolgt nach der Raumlufttemperatur. Der Sollwert wird konstant auf 21°C gesetzt. Die Vorlauftemperatur wird ebenfalls modifiziert. Dabei werden zwei Perioden eingeführt:

- Periode I vom 01.01. bis zum 16.08. Vorlauftemperatur konstant 35°C .
- Periode II vom 17.08. folgt die Vorlauftemperatur einer Heizkurve (siehe Abbildung 2.6) mit folgender mathematischen Formulierung:

$$- T_{VL} = \max(21^{\circ}\text{C}, \min(35^{\circ}\text{C}, -0.5 \cdot T_{out} + 30\text{K}))$$

Da der Massestrom jetzt nicht mehr dauerhaft konstant ist, sondern durch das geschlossene Thermostatventil auch auf null sinken kann, wird eine Druckpumpe eingesetzt. Diese Pumpe erhält eine maximale Druckerhöhung von 23.438 kPa . Diese Druckerhöhung entspricht einem maximalen Förderstrom von $m = 0.1\text{ kg/s}$. Die Pumpe erhält einen idealen Wirkungsgrad von 100%. Es ist sicherzustellen, dass die Vorlauftemperatur nach der Pumpe den

Vorgaben entspricht. Dies kann durch eine Anlagenkomponente wie Kessel, Wärmepumpe oder einen Zeitplan erfolgen. Die Fußbodenheizung hat einen Druckverlust, welcher der Druckerhöhung der Pumpe entspricht.

Anmerkung: Die Regelung des Thermostatventils soll einem Zweipunktregler mit einer Hysterese von $\Delta T = 1\text{ K}$ entsprechen ($T_{RL} < 20^\circ\text{C}$: Ventil auf; $T_{RL} > 21^\circ\text{C}$: Ventil zu).

2.6.5 Prüfvariante 5 (10.5) - Fußbodenheizung mit radiativer Wärmeübertragung Realklima

Alle Parameter aus der Prüfvariante 10.4 sind zu übernehmen. Der langwellige Strahlungsaustausch der Innenoberflächen erfolgt mittels der aufgelisteten Parameter:

- Der Emissionskoeffizient aller Innenflächen wird auf $\varepsilon = 1$ gesetzt (die komplette langwellige Strahlung wird absorbiert/emittiert).

2.6.6 Prüfvariante 6 (10.6) - Fußbodenkühlung mit radiativer Kälteübertragung Realklima

Alle Parameter aus der Prüfvariante 10.4 sind zu übernehmen. Ausgetauscht wird das Klima B gegen das Klima von Madrid (siehe Wetterdatei `Madrid.epw`). Der langwellige Strahlungsaustausch der Innenoberflächen erfolgt mittels der aufgelisteten Parameter:

- Der Emissionskoeffizient aller Innenflächen wird auf $\varepsilon = 1$ gesetzt (die komplette langwellige Strahlung wird absorbiert/emittiert).

Zudem wird ein Thermostatventil eingeführt. Die Regelung des Thermostatventils erfolgt nach der Raumlufttemperatur. Der Sollwert wird konstant auf 24°C gesetzt. Die Vorlauftemperatur wird ebenfalls modifiziert. Die Vorlauftemperatur folgt einer Kühlkurve (siehe Abbildung 2.7) mit folgender mathematischen Formulierung:

- $T_{VL} = \max(18^\circ\text{C}, \min(24^\circ\text{C}, -0.5 \cdot T_{out} + 36.5\text{ K}))$

Anmerkung: Die Regelung des Thermostatventils soll einem Zweipunktregler mit einer Hysterese von $\Delta T = 1\text{ K}$ entsprechen ($T_{RL} < 24^\circ\text{C}$: Ventil zu; $T_{RL} > 25^\circ\text{C}$: Ventil auf). Die Einschwingphase für den Testfall mit dieser Wetterdatei (`Madrid.epw`) kann vernachlässigt werden, da der Betrachtungszeitraum für die Auswertung in den Sommermonaten liegt.

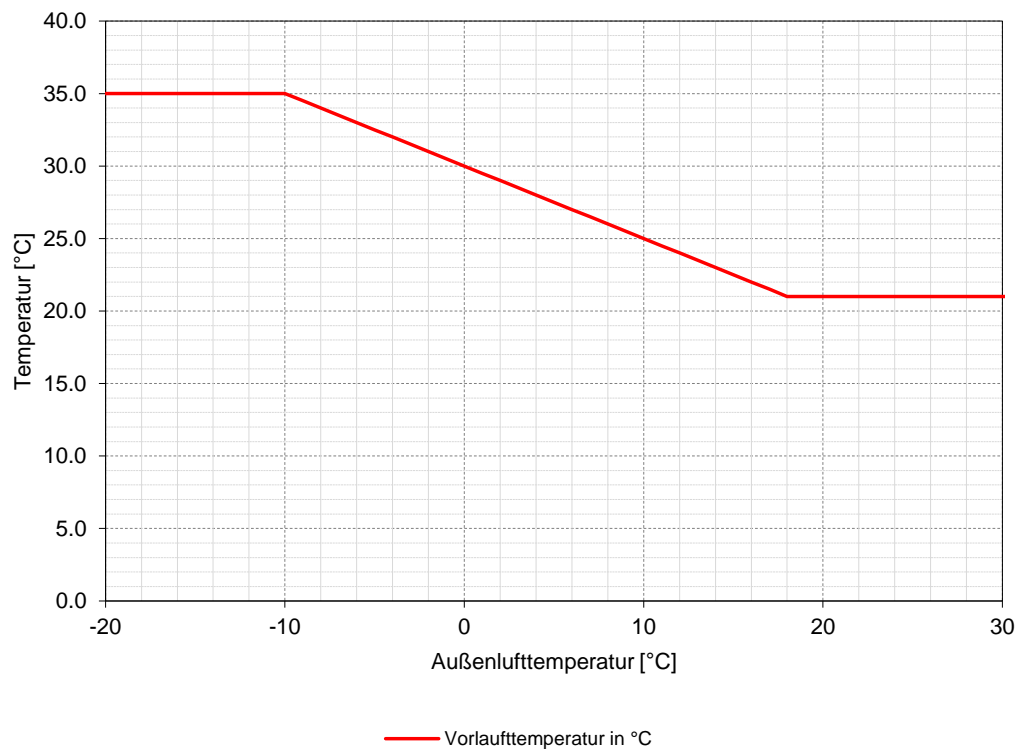


Abbildung 2.6: Heizkurve

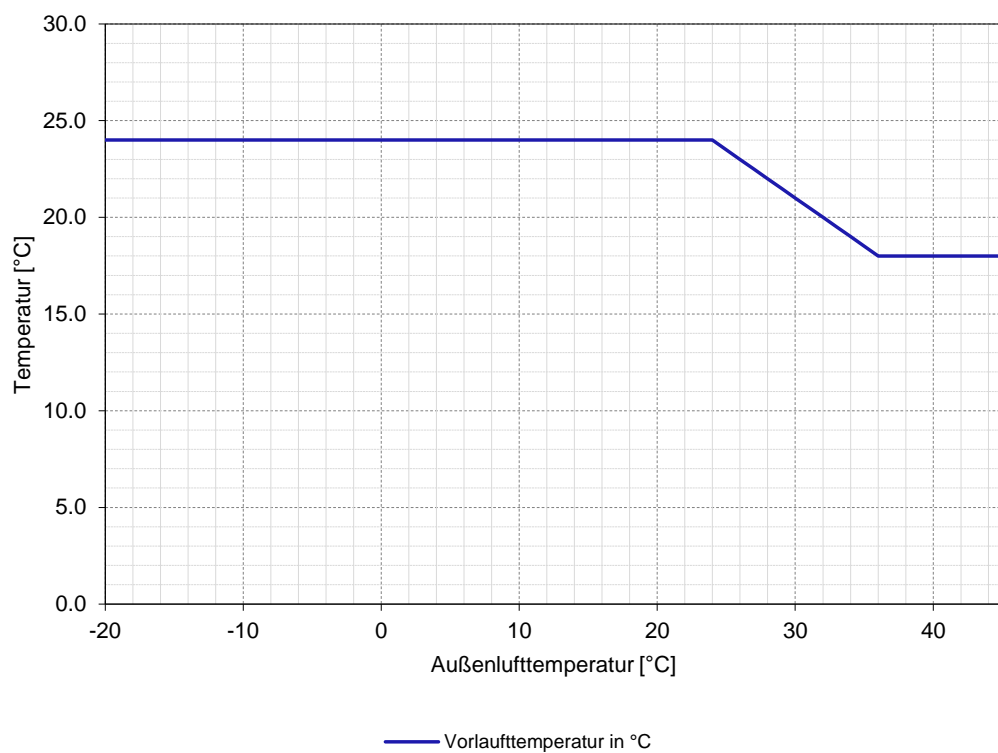


Abbildung 2.7: Kühlkurve

3 Geforderte Ergebnisse

Für jeden Berechnungszeitpunkt ist anzugeben:

- Temperatur der Innenluft als Momentanwert [°C]
- Innenoberflächentemperatur von Fußboden und Decke sowie jeweils der 4 Wände (Nord, Ost, Süd, West) als Stundenmittelwert [°C] (ab Prüfvariante 10.2)
- Rücklauftemperatur des Fluids als Stundenmittelwert [°C] (ab Prüfvariante 10.2)
- konvektiver Wärmeeintrag oder -entzug an den Raumluftknoten (Leistung von Heizungs- und Kühlungs-komponenten) [W] (Prüfvariante 10.1)

Die Ergebnisdaten sind mit mind. zwei Nachkommastellen zu bestimmen.

3.1 Regeln für die Berechnung

Es bestehen folgende Berechnungsregeln:

- Es soll jeweils die Normalzeit (Winterzeit) verwendet werden.
- Es soll kein Schaltjahr verwendet werden.
- Die Berechnungsergebnisse sollen in Stundenschritten protokolliert werden.
 - Bei Berechnungsprogrammen mit kleineren Schrittweiten (bspw. Sekunden) sollen die Ausgabewerte zur vollen Stunde angegeben werden.
 - Bei Ausgaben in unregelmäßigen Intervallen sollen die Ausgabewerte zur vollen Stunde gegebenenfalls durch lineare Interpolation (bei unregelmäßigen Ausgabeintervallen) bestimmt und angegeben werden. Eine entsprechende Information über die Berechnungsmethode ist zu dokumentieren.

3.2 Ergebnisdatenablage

Es kann die Ergebnisdatenvorlage `SimQ_TF10_Konditionierung_Ergebnisvorlage.ods` verwendet werden.

Bei Ablage in einer ASCII-Datei soll eine Kopfzeile und danach Datenzeilen wie in folgendem Beispiel (die Spalten sind mit Tabulator-Zeichen getrennt) verwendet werden¹:

Time [h]	Var010.1.Raumlufttemperatur [C]	Var10.1.Heizleistung [W]	Var10.1.Kühlleistung [W]	Var010.2.Raumlufttemperatur [C]	...
0	20	200	20	100	
1	20	200	20	100	
2	20	200	20	100	
3	20	200	20	100	
4	20	200	20	100	
...					

Es muss weiterhin bei der Ablage der Daten die verwendete Version des Programmes und der Name des Bearbeiters dokumentiert werden.

4 Auswertung

Bearbeitung dieses Punktes wird später durchgeführt und steht derzeit noch offen zur Diskussion.

¹Hinweis: Eine solche Datei erhält man automatisch, wenn man einen entsprechenden Inhalt einer Excel-Tabelle markiert und mittels Kopieren+Einfügen in einen Texteditor kopiert.