

SimQuality - Validierung der gekoppelten Wärmeleitung/-speicherung und kurzwelligigen Strahlung

IBK, TU Dresden

6. Januar 2022

Zusammenfassung

Für die Berechnung der Wärmebilanz von Raumluftknoten ist die korrekte Abbildung der gekoppelten Wärmeleitung/-speicherung mit der kurzwelligigen Strahlung erforderlich. Der nachfolgend beschriebene Testfall prüft die Funktionalität eines Modells bzw. die Modellimplementierung/Software hinsichtlich der gekoppelten Wärmeleitung und kurzwelligigen Strahlung.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Gleichungen	2
2	Aufgabenstellung	3
2.1	Geometrie	3
2.2	Wetter	3
2.3	Modellparameter	4
2.3.1	Opake Bauteile/Elemente	4
2.3.2	Anfangsbedingung	4
2.3.3	Lüftung	4
2.3.4	Übergangskoeffizienten	4
2.4	Prüfvarianten	4
2.4.1	Prüfvariante 06.1 - massiv	4
2.4.2	Prüfvariante 06.2 - leicht	4
3	Ergebnisse	5
3.1	Regeln für die Berechnung	5
3.2	Geforderte Ergebnisse	5
3.3	Ergebnisdatenablage	5
4	Auswertung	5
4.1	Validierungskriterien	5

1 Grundlegende Gleichungen

Die Gleichungen für die Berechnung der Wärmeleitung und -speicherung in Bauteilen sowie der korrekten Abbildung von Strahlungslasten sind unter anderem in folgender Literatur zusammengestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass 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>
- DIN ISO 13791:2012, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2012)

Referenzierte Testfälle

SimQuality (TF03). "Validierung der Wärmeleitung durch opake Elemente".

2 Aufgabenstellung

2.1 Geometrie

Für die Berechnung der gekoppelten Wärmeleitung-/speicherung und kurzwelligen Strahlung wird folgende Geometrie aus SimQuality (TF03) verwendet:

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

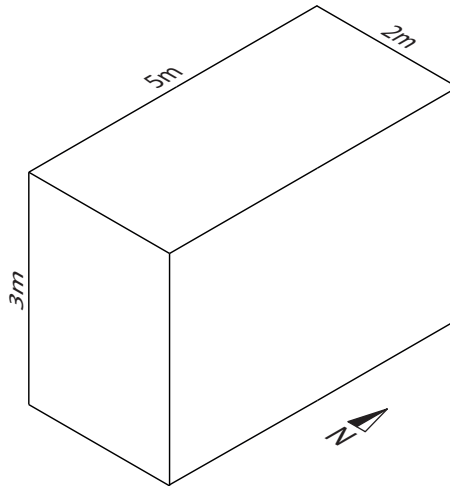


Abbildung 2.1: Abbildung des Testraumes mit Bemaßung

Tabelle 2.1: Merkmale der Bauteile für die 3 Prüfvarianten

Konstruktionstyp	Material	Dicke	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Spezifische Wärmekapazität
Nr		d m	λ $\frac{W}{m \cdot K}$	ρ $\frac{kg}{m^3}$	c $\frac{J}{kg \cdot K}$
1	SimQ_Beton	0.2	1.20	2000	1000
2	SimQ_Dämmung	0.1	0.04	50	1000

2.2 Wetter

Für die Untersuchung wird ein speziell erzeugtes Wetter verwendet (siehe Wetterdatei SIMQ_TF06_Klima.epw). Die Wetterdatei ist so angepasst, dass die Außentemperatur über das Jahr hinweg konstant auf $T_{out} = 20^\circ\text{C}$ gesetzt ist. Weiterhin ist die kurzwellige, direkte Normalstrahlung für die Periode ab dem 1. bis einschließlich 30. Juni zwischen 07:00 und 20:00 Uhr auf $Q_{SW,dir} = 800 \frac{W}{m^2}$ und für die Periode ab dem 1. Dezember bis einschließlich 31. Dezember von 10:00 bis 16:00 Uhr auf $Q_{SW,dir} = 200 \frac{W}{m^2}$ gesetzt. Ansonsten beträgt die kurzwellige Direktstrahlung null. Die kurzwellige Diffusstrahlung wird konstant auf null über das Jahr hinweg gesetzt.

$$Q_{SW,dir} \left[\frac{W}{m^2} \right] = \begin{cases} 800 & \text{zw. 7 und 20 Uhr im Juni} \\ 200 & \text{zw. 10 und 16 Uhr im Dezember} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Weiterhin wird der Albedo des Bodens auf $a = 0.2$ gesetzt. Der Standort für die Berechnung der Sonnenstände ist Potsdam (Breitengrad: 52.383° , Längengrad: 13.067°).

Anmerkung: Im Klimadatensatz ist die horizontale Globalstrahlung dahingehend angepasst, dass diese den geforderten Direktnormalstrahlungswerten entsprechen. Das ist notwendig für Programme, welche die direkte Normalstrahlung aus der horizontalen Globalstrahlung und der Diffusstrahlung errechnen.

2.3 Modellparameter

2.3.1 Opake Bauteile/Elemente

Alle Elemente, einschließlich Decke und Fußboden sind identisch (gleiche Materialparameter und Schichtenfolge) und weisen die gleichen Randbedingungen auf, siehe Tabelle 2.1. Es werden jedoch zwei Varianten mit unterschiedlichen Konstruktionen überprüft, die später erläutert werden.

2.3.2 Anfangsbedingung

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

Anmerkung: Die Wetterdatei ist dahingehend angepasst, dass die Außenlufttemperatur bis zum 1. Juni konstant auf $T_{out} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gesetzt ist und damit alle Programme im eingeschwungenen Zustand sein müssen. Die Auswertung beginnt dann ab dem 1. Juni bzw. dem 1. Dezember.

2.3.3 Lüftung

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

2.3.4 Übergangskoeffizienten

Für die Wärmeübertragungsrandbedingungen sind folgende Modellparameter zu wählen:

- Der Absortionskoeffizient (Wärmeübertragung kurzwelliger Strahlung) wird für alle Außenflächen auf $\alpha = 0.6$ gesetzt.
- Die Emissionsgrade der Innen- und Außenflächen jedes Elements, einschließlich Decke und Fußboden, werden mit null angesetzt (die Wärmeübertragung durch langwellige Strahlung an die Innen- und Außenflächen wird mit null angesetzt).
- Der innere konvektive Wärmeübergangskoeffizient jedes Elements, einschließlich Decke und Fußboden beträgt: $h_{c,i} = 2.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
- Der äußere konvektive Wärmeübergangskoeffizient jedes Elements, einschließlich Decke und Fußboden beträgt: $h_{c,e} = 8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

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.

2.4 Prüfvarianten

Es werden zwei Prüfvarianten mit geringer und hoher Speichermasse untersucht.

2.4.1 Prüfvariante 06.1 - massiv

In dieser Variante wird allen Bauteilen der Konstruktionstyp Nr. 1 (massives Bauteil) aus Tab. 2.1 zugewiesen.

2.4.2 Prüfvariante 06.2 - leicht

In dieser Variante wird allen Bauteilen der Konstruktionstyp Nr. 2 (leichtes Bauteil) aus Tab. 2.1 zugewiesen.

3 Ergebnisse

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 gegebenfalls durch lineare Interpolation (bei unregelmäßigen Ausgabeintervallen) bestimmt und angegeben werden. Eine entsprechende Information über die Berechnungsmethode ist zu dokumentieren.

3.2 Geforderte Ergebnisse

Für jeden Berechnungszeitpunkt ist anzugeben:

- Temperatur der Innenluft als Momentanwert [$^{\circ}\text{C}$]
- Absorbierte kurzwellige Strahlungsintensität aller sechs Außenflächen einzeln aufgeschlüsselt als Stundenintegral [W/m^2]
- konvektive Wärmeübertragung aller sechs Innenoberflächen einzeln aufgeschlüsselt zum Raumlufknoten als Stundenintegral [W/m^2] (Der Wärmestrom wird aus dem Bauteil heraus über die Oberfläche hin zum angrenzenden Luftknoten als positiv definiert)
- Temperatur der Innenoberfläche aller sechs Bauteile einzeln aufgeschlüsselt [$^{\circ}\text{C}$]

Die Ergebnisdaten sind mit mind. zwei Nachkommastellen zu bestimmen.

3.3 Ergebnisdatenablage

Es kann die Ergebnisdatenvorlage `SIMQ_TF06_Strahlung+Speicherung_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]		Var06.1_LuftTemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Var06.1_N_QSWRad [W]	Var06.1_E_QSWRad [W]	Var06.1_S_QSWRad [W]
		Var06.1_W_QSWRad [W]...			
0	20.0	0	0	0	0
1	20.0	0	0	0	0
2	20.0	0	0	0	0
...					

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

4 Auswertung

4.1 Validierungskriterien

In der Bewertung werden unterschiedliche Kriterien geprüft, die nachfolgend benannt werden:

1. Absolute Abweichungen der Raumlufthtemperaturen für zwei repräsentative Tage (26. Juni sowie den 26. Dezember) ($< 0.5 \text{ K}$ Abweichung zulässig)
2. Statistische Abweichungen der Raumlufthtemperaturen für zwei repräsentative Tage (26. Juni sowie den 26. Dezember). Siehe Erklärung nachfolgend.

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

Um den dynamischen Verlauf der Programme qualitativ bewerten zu können, werden unterschiedliche statistische Methoden verwendet. Dafür dient einerseits der „*Coefficient of Variation*“ ($CV(RMSD)$) andererseits der *Coefficient of Determination for non-linear regression* (R^2). Für den $CV(RMSD)$ wird zuerst die *Root-mean-square-deviation* ($RMSD$) definiert, die auch als *Wurzel der mittleren Fehlerquadratsummen* bezeichnet wird. Je geringer dieser Wert ist, desto geringer ist die Abweichung einer Kurve von der Referenzkurve:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (y_{Tool,t} - y_{Ref,t})^2}{T}}$$

Anschließend wird der $CV(RMSD)$ anhand des Mittelwertes der Prüfwerte des zu überprüfenden Programmes \bar{y}_{Tool} gebildet:

$$CV(RMSD) = \frac{RMSD}{\bar{y}_{Tool}}$$

Weiterhin wird der bereits genannte R^2 -Wert für die Auswertung verwendet, der anzeigt, wie gut die vom zu validierenden Programm errechneten Werte mit den Referenzwerten übereinstimmen. Ist der Wert nahe 1 bzw. 100% so ist die Übereinstimmung sehr gut. Wird der Wert geringer, so ist Übereinstimmung nicht hoch. Dieser bildet sich wie folgt und kann auch als *Bestimmtheitsmaß* bezeichnet werden. Normalerweise wird dieser nur für lineare Regressionen verwendet, kann aber auch abweichend dazu für die Analyse der Kurvenübereinstimmung verwendet werden:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (y_{Tool,t} - \bar{y}_{Ref})^2}{\sum_{t=1}^T (y_{Ref,t} - \bar{y}_{Ref})^2}$$

Für die Prüfvarianten 01 bis 03 bilden sich folgende (noch zu diskutierende) Bewertungskriterien:

- $CV(RMSD) \leq 2\%$
- $R^2 \geq 80\%$