

SimQuality - Validierung der Wärmegewinne/-verluste durch Lüftung

IBK, TU Dresden

27. Januar 2022

Zusammenfassung

Für die Berechnung von Wärmeströmen zwischen Innen- und Außenluft ist die korrekte Abbildung des Luftwechsels in der thermischen Gebäudesimulation erforderlich. Der nachfolgend beschriebene Testfall prüft die Funktionalität eines Modells bzw. die Modellimplementierung/Software hinsichtlich der Bestimmung des Luftwechsels zwischen Innen- und Außenluft und der sich daraus ergebenden Energieströme.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Gleichungen	2
2	Aufgabenstellung	2
2.1	Geometrie	2
2.2	Wetter	3
2.3	Modellparameter	3
2.3.1	Opake Bauteile/Elemente	3
2.3.2	Anfangsbedingung	3
2.3.3	Lüftung	4
2.3.4	Randbedingungen/Übergangskoeffizienten	4
2.4	Prüfvarianten	4
2.4.1	Variante 1 - kein Luftwechsel	4
2.4.2	Variante 2 - konstant hohe Luftwechselrate	4
2.4.3	Variante 3 - konstante niedrige Luftwechselrate mit erhöhtem Nachtluftwechsel im Sommer	4
2.4.4	Variante 4 - geregelte Lüftung	5
3	Ergebnisse	6
3.1	Regeln für die Berechnung	6
3.2	Geforderte Ergebnisse	6
3.3	Ergebnisdatenablage	6
4	Auswertung	6

1 Grundlegende Gleichungen

Die Gleichungen für die Berechnung der Lüftung sind in folgender Literatur zusammengestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass zum Teil unterschiedliche Konventionen bzw. Definitionen für Begriffe und Größen verwendet werden.

- DIN ISO 13791:2012, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2012)
- Feist, Wolfgang: „Thermische Gebäudesimulation“; Karlsruhe 1994
- Nicolai, Andreas: „Physikalische Grundlagen des thermischen Raummodells THERAKLES“; Dresden 2013

Die berechneten Lüftungswärmeströme hängen maßgeblich von der Innenraumlufttemperatur ab. In diesem Testfall wird eine träge Konstruktion mit extrem gut gedämmten Außenwänden modelliert. Die Raumlfttemperatur ändert sich nur geringfügig durch Wärmeleitung und maßgeblich durch Luftwechsel mit der Außenluft. Dadurch ist eine hohe Vergleichbarkeit der berechneten Lüftungswärmeströme und der Bilanzierung der im Raum und den Konstruktionen gespeicherten Energie gegeben.

Referenzierte Testfälle

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

SimQuality (TF04). "Validierung der Wärmeleitung und -speicherung in Bauteilen unter dynamischen Randbedingungen".

SimQuality (TF06). "Validierung der gekoppelten Wärmeleitung/-speicherung und kurzwelligigen Strahlung".

2 Aufgabenstellung

2.1 Geometrie

Für die Berechnung der Infiltrationswärmeverluste 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 $V = 30\text{ m}^3$

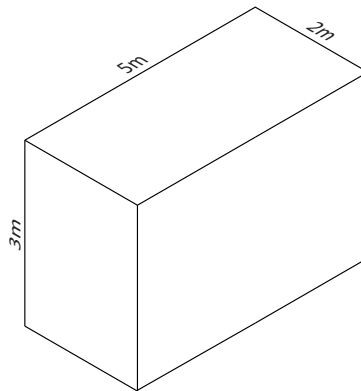


Abbildung 2.1: Abbildung des Testraumes mit Bemaßung

Die Ausrichtung ist unwichtig, da allseitig die gleichen Randbedingungen gelten. Der Konstruktionsaufbau ist allseitig gleich, siehe Tabelle [2.1](#).

Tabelle 2.1: Konstruktionsaufbau für alle Umfassungskonstruktionen

	Material	Dicke	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Spezifische Wärmekapazität
Nr		d	λ	ρ	c
		m	$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$
innen - $h_c = 2.5 \frac{W}{m^2 K}$					
1	SimQ_Beton	0.20	1.20	2000	1000
2	SimQ_Dämmung_2	0.30	0.02	50	1000
außen - $h_c = 8 \frac{W}{m^2 K}$					

Die Wärmedämmeigenschaft der Dämmschicht begrenzt wirkungsvoll die Änderung der Innenraumtemperatur infolge von Wärmeleitung durch die Konstruktion. Somit wird der Luftwechsel zum maßgeblichen Mechanismus der Raumlufttemperaturanpassung an die Außenluft.

Anmerkung: Alle Konstruktionen haben den gleichen Schichtaufbau und die gleiche Schichtenfolge von innen nach außen. Daher ist für die Ergebnisse die konkrete Geometrie nicht relevant, wichtig ist jedoch das *Verhältnis* von Gesamtumfassungsfläche zum Luftvolumen im Innenraum. Insbesondere ist daher der *Innenmaßbezug* zu beachten.

2.2 Wetter

Für diesen Testfall wird das Wetter für den Standort Potsdam verwendet (SIMQ_Potsdam.epw). Die ersten 20 Tage des Klimadatensatzes sind modifiziert, um eine einheitliche Startbedingung zu ermöglichen.

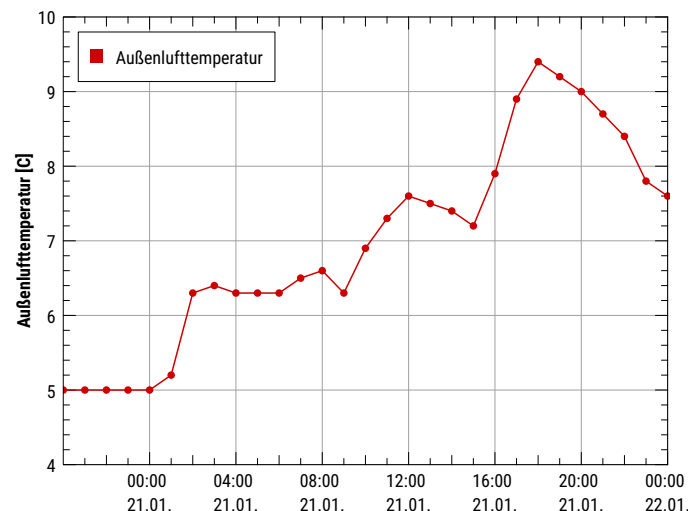


Abbildung 2.2: Außentemperaturverlauf am 21.01. In den ersten 20 Tagen sind konstant 5°C eingestellt, um ein Einschwingen der Konstruktion auf den Startwert zu gewährleisten.

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.

2.3.2 Anfangsbedingung

Die Initialtemperatur aller Bauteile und der Raumluft beträgt $T_{initial} = 5^\circ C$ zum Zeitpunkt $t = 0 h$.

Anmerkung: Einige Simulationsprogramme können die geforderte uniforme Anfangsbedingung nicht einstellen, da automatisiert eine Einschwingphase vor Simulationsbeginn gerechnet wird. Im Klimadatensatz ist daher in den ersten 20 Tagen die Außenlufttemperatur auf einen konstanten Wert gesetzt. Nach dieser Anfangszeit sollte ein Angleichen an die klimatischen Randbedingungen erfolgt sein. Die Validierungskriterien verwenden nur die

Ausgaben ab dem 1. Februar. Es sollten jedoch alle Stundenwerte des Jahres ausgegeben werden, um diesen Einschwingvorgang darstellen zu können.

2.3.3 Lüftung

Es werden mehrere Prüfvarianten betrachtet, welche sich jeweils in der anzusetzenden Luftwechselrate unterscheiden.

Anmerkung: Für die Berechnung wird von einer konstanten Luftdichte von ca. $1,2 \text{ kg/m}^3$ bei trockener Luft (innen und außen) ausgegangen. Bei Simulationsprogrammen, welche mit feuchter Luft rechnen, sollte die Luftfeuchtigkeit im Klimadatensatz und im Gebäude auf sehr niedrige Werte eingestellt werden (ca. 1-2%), um Abweichungen aus unterschiedlichen Dichten und Wärmekapazitäten der Raumluft zu reduzieren. Dadurch können auch Kondensationseffekte an Bauteiloberflächen verhindert werden. Falls die Dichte des ausgetauschten Luftvolumens temperaturabhängig ist oder aus anderen Gründen variiert (luftdruckabhängig etc.), sollte dies notiert werden. Bei Dichteberechnungen aus Luftdruck (Klimadatensatz) sollte die Standorthöhe auf 0 m über Normalnull geändert werden.

2.3.4 Randbedingungen/Übergangskoeffizienten

Für die opaken Bauteile gilt:

- Die Wärmeübertragung kurzwelliger Strahlung wird mit null angesetzt (Absorptionskoeffizient der Außenflächen wird auf null 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: $h_{c,i} = 2,5 \frac{W}{m^2 K}$
- Der äußere konvektive Wärmeübergangskoeffizient jedes Elements, 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, kann in diesem Testfall auch ein ungefährender Wert bzw. ein automatisch von der Software berechneter Wert verwendet werden. Aufgrund der guten Dämmeigenschaften wirken sich eventuelle Abweichungen vom geforderten äußeren Übergangskoeffizienten in diesem Testfall nur minimal aus.

2.4 Prüfvarianten

2.4.1 Variante 1 - kein Luftwechsel

Diese Basisvariante stellt ähnlich [SimQuality \(TF04\)](#) die Situation einer frei schwingenden Konstruktion dar. Die Luftwechselrate ist auf $n = 0 \frac{1}{h}$ zu setzen. Die Raumlufttemperatur ändert sich nur sehr langsam infolge der sehr geringen Wärmeleitung durch die gut gedämmte Umfassungskonstruktion. Diese Prüfvariante dient primär zur Prüfung der korrekten Geometrie- und Konstruktionsmodellierung.

2.4.2 Variante 2 - konstant hohe Luftwechselrate

Die Lüftung ist konstant mit $n = 2 \frac{1}{h}$ (bezogen auf das Raumluftvolumen) anzusetzen. Der Austausch findet mit der Außenluft statt und es wird keine Wärmerückgewinnung angesetzt.

2.4.3 Variante 3 - konstante niedrige Luftwechselrate mit erhöhtem Nachtluftwechsel im Sommer

In dieser Variante ist in der Zeit vom 1. Juni bis einschließlich 30. September in der Zeit von 20:00 bis 6:00 ein erhöhter Nachtluftwechsel von $n = 2 \frac{1}{h}$ (bezogen auf das Raumluftvolumen) anzusetzen, ansonsten beträgt der Luftwechsel $n = 0,5 \frac{1}{h}$. [Abbildung 2.3](#) zeigt den Zeitplan für den Luftwechsel.

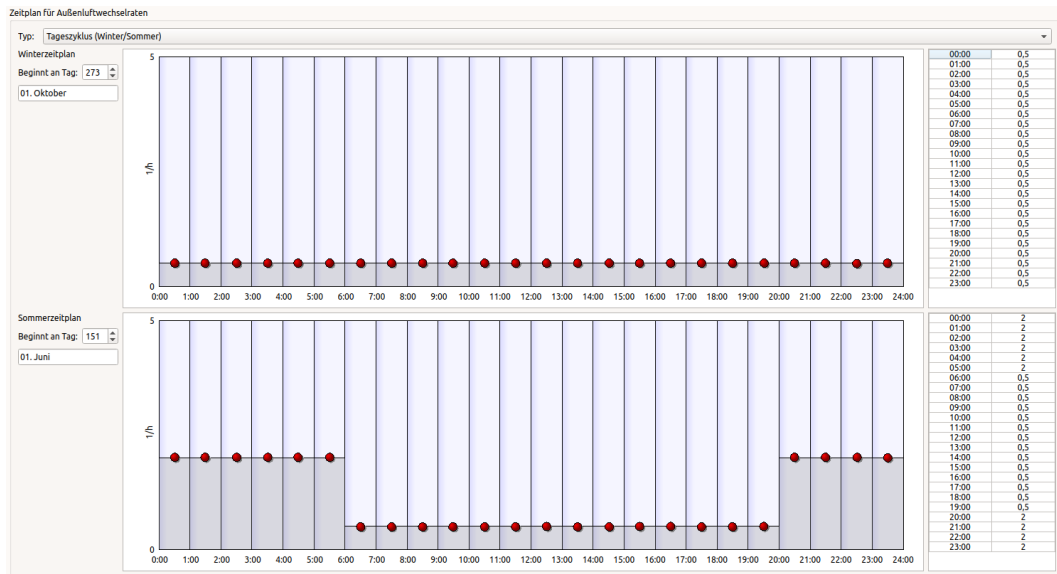


Abbildung 2.3: Zeitplan für Luftwechselrate in Prüfvariante 3

2.4.4 Variante 4 - geregelte Lüftung

In dieser Variante beträgt der Grundluftwechsel ganzjährig $n = 0,5 \frac{1}{h}$ (bezogen auf das Raumluftvolumen). In der Zeit vom 1. Juni bis einschließlich 30. September ist ganztägig ein erhöhter Luftwechsel von $n = 2 \frac{1}{h}$ anzusetzen, falls folgende Kriterien gelten:

- Raumlufthtemperatur ist $\geq 20^\circ\text{C}$
- Raumlufthtemperatur ist $>$ als die Außenlufttemperatur

Die Lüftungsregelung soll ein Totzeitglied von 15 Minuten enthalten.

Anmerkung: Die in Tab. 2.2 dargelegte Konstruktion (Analog Konstruktion 3 aus SimQuality (TF03)) wird für diesen Testfall für alle Außenflächen verwendet. Weiterhin wird der Absorptionsgrad der Außenflächen auf 0.6 gesetzt, um höhere Raumlufthtemperaturen zu erzielen. Der Albedo des Bodens wird hierfür auf 0.0 gesetzt. Die Ausrichtung des Raumes ist mit der schmalen Stirnseite nach Süden analog zu Testfall SimQuality (TF06).

Tabelle 2.2: Konstruktionsaufbau für alle Umfassungskonstruktionen

Material	Dicke	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Spezifische Wärmekapazität
Nr	d	λ	ρ	c
	m	$\frac{W}{m \cdot K}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$
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 - $h_c = 8 \frac{W}{m^2 K}$				

3 Ergebnisse

3.1 Regeln für die Berechnung

Es bestehen folgende Berechnungsregeln:

- Es wird jeweils die Normalzeit (Winterzeit) verwendet.
- Es wird kein Schaltjahr verwendet.
 - 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 Geforderte Ergebnisse

Es sollen Berechnungsergebnisse der Innenlufttemperatur (in °C) in Stundenschritten für das gesamte Jahr als Momentanwerte protokolliert werden. Die Innenlufttemperaturen und der Wärmestrom über den Luftwechsel sind mit mind. zwei Nachkommastellen als Stundenmittelwert zu bestimmen. Weiterhin muss angegeben werden, ob die Dichte des ausgetauschten Luftvolumens temperaturabhängig ist.

3.3 Ergebnisdatenablage

Die Ergebnisse werden entsprechend der Beispielergebnisdatei `SIMQ_TF05_Lüftung_Ergebnisvorlage.tsv` abgelegt. Zur Erstellung dieser Datei kann die Vorlage `SIMQ_TF05_Lüftung_Ergebnisvorlage.ods` verwendet werden, wobei nach Eintragen der Ergebnisse das Tabellenblatt in eine Textdatei kopiert wird.

4 Auswertung

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

1. Monantsbilanzen der Lüftungswärmeströme für das ganze Jahr ab dem Monat Februar (< 10 % Abweichung zulässig)
2. Absolute Abweichungen der Raumlufttemparturen in der Sommerwoche (13. August bis 20. August) mit höchsten Außenlufttemperaturen ($\Delta T < 0.3 K$ Abweichung zulässig)
3. Statistische Abweichungen der Raumlufttemparturen an den Tagen 31. Juli bis 02. August. Siehe Erklärung nachfolgend.

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:

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