

SimQuality - Validierung der Wärmeleitung durch opake Elemente

IBK, TU Dresden

5. Juli 2021

Zusammenfassung

Für die Berechnung von Wärmetransportprozessen in der thermischen Gebäudesimulation ist die korrekte Abbildung der dynamischen Wärmeleitung durch opake Bauteile und die Speicherung in opaken Bauteilen notwendig (Wand-/Fußboden-/Deckenkonstruktionen etc.). Der nachfolgend beschriebene Testfall prüft die Funktionalität eines Modells bzw. die Modellimplementierung/Software hinsichtlich der Berechnung der instationären Wärmeleitung durch opake Bauteile.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Gleichungen	2
1.1	Berechnungsmodelle	2
2	Aufgabenstellung	2
2.1	Geometrie	2
2.2	Modellparameter	3
2.2.1	Lüftung	3
2.2.2	Randbedingungen/Übergangskoeffizienten	3
2.2.3	Verlauf der Außenlufttemperatur	4
2.2.4	Anfangsbedingung	4
3	Ergebnisse	5
3.1	Regeln für die Berechnung	5
3.2	Geforderte Ergebnisse	5
3.3	Ergebnisdatenablage	5
4	Auswertung	5

1 Grundlegende Gleichungen

Die Gleichungen für die Berechnung der Wärmeleitung- und -speicherung in Bauteilen 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)

1.1 Berechnungsmodelle

Der nachfolgend umschriebene Testfall stammt aus der DIN EN ISO 13791 „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden“ und wird in Kapitel 8.2.2 „Wärmeleitung durch opake Bauteile“ näher beschrieben.

2 Aufgabenstellung

Bei diesem Testfall wird ein Testraum einem Klimasprung der Außenlufttemperatur von 20°C auf 30°C innerhalb einer Stunde ausgesetzt. Es gibt insgesamt 4 Prüfvarianten, in denen der Schichtaufbau und die Materialeigenschaften der Umfassungskonstruktion verändert werden. In jeder Prüfvariante sind alle 6 Umfassungskonstruktionen identisch aufgebaut und haben die gleichen Randbedingungen.

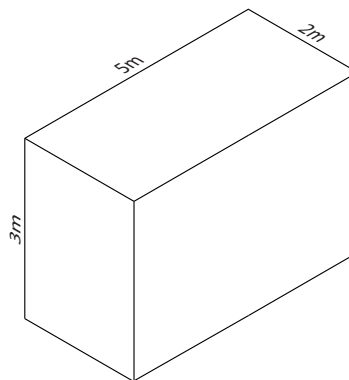


Abbildung 2.1: Geometrie des Testraums

Dieser Testfall ist an den *Prüffall 1 der DIN 13791* angelehnt. In der Norm wird eine Raumgeometrie von $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ beschrieben. Da die Wärmekapazität der Raumluft gleichzeitig vernachlässigt wird (Wärmekapazität der Luft = 0), ist die tatsächliche Geometrie für die Ergebnisse unerheblich. Die in Abb. 2.1 gezeigte Geometrie wird mit Hinblick auf die nachfolgenden Testfälle gewählt. Im Sinne des Testfalls ist es allerdings auch möglich, nur eine einzige Außenwand zu modellieren, oder alle Innenwände sonst allseitig adiabatisch zu definieren.

2.1 Geometrie

Die *Innenmaße* des Raumes betragen $2\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$. Wärmebrücken (Eckbereiche) werden in diesem Fall explizit *nicht betrachtet*, d.h. es findet ausschließlich eindimensionale Wärmeleitung durch die Umfassungskonstruktionen statt.

Es sind insgesamt 4 verschiedene Konstruktionen/Materialdatenvarianten zu berechnen. Der Konstruktionsaufbau und die Materialeigenschaften sind in Tabelle 2.1 für alle 4 Prüfvarianten angegeben.

Tabelle 2.1: Merkmale der Bauteile für die 4 Prüfvarianten

Konstruktionstyp	Material	Dicke	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Spezifische Wärmekapazität
Nr	Name	d m	λ $\frac{W}{m \cdot K}$	ρ $\frac{kg}{m^3}$	c $\frac{J}{kg \cdot K}$
1	SimQ_Beton	0.200	1.20	2000	1000
2	SimQ_Dämmung	0.100	0.04	50	1000
3*	SimQ_Beton	0.200	1.20	2000	1000
	SimQ_Dämmung	0.100	0.04	50	1000
	SimQ_Putz	0.005	0.14	800	1500
4*	SimQ_Putz	0.005	0.14	800	1500
	SimQ_Dämmung	0.100	0.04	50	1000
	SimQ_Beton	0.200	1.20	2000	1000

*von außen nach innen gelistet

Anmerkung: Alle 6 Begrenzungsflächen haben den gleichen Schichtaufbau und die gleiche Ausrichtung bezüglich des Prüfraumes. Da es keine ausrichtungsbezogenen Ströme (wie z.B. Solarstrahlung) in diesem Testfall gibt, könnten diese Flächen bei der Modellierung zusammengefasst werden, ohne die Ergebnisse zu verändern. Dadurch ist es auch möglich, die Ergebnisse mit einem detaillierten dynamischen Wärmebrückenprogramm zu reproduzieren. Es ist jedoch empfehlenswert, in der Gebäudeenergiesimulation tatsächlich einen Raum zu definieren, um eventuelle Probleme bei der Modellbildung/Parameterdefinition zu prüfen.

2.2 Modellparameter

2.2.1 Lüftung

- Der Luftvolumenstrom mit der Außenluft wird mit null angesetzt.
- Die Wärmekapazität der Raumluft wird mit null angesetzt.

Anmerkung: In Programmen, welche stets eine endliche Wärmekapazität der Raumluft verlangen, bzw. zur Stabilisierung der numerischen Lösung eine Mindestluftmasse in jeden Raumluftknoten legen, kann der Testfall stattdessen mit einer entsprechend größeren Dimension des Raumes, bspw. $10\,m \times 10\,m \times 10\,m$ durchgeführt werden. Da es sich um ausschließlich eindimensionale Wärmeleitungsprozesse durch den gleichen Schichtaufbau handelt und der Raumluftknoten keine Kapazität besitzt, hat die Dimension des Raumes keinerlei Auswirkung auf das Endergebnis.

2.2.2 Randbedingungen/Übergangskoeffizienten

Alle Elemente, einschließlich Decke und Fußboden sind identisch und weisen die gleichen Randbedingungen auf.

- 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 Konvektionswärmeübergangskoeffizient jedes Elements, einschließlich Decke und Fußboden, beträgt: $h_{c,i} = 2.5 \frac{W}{m^2 K}$
- Der äußere Konvektionswärmeübergangskoeffizient 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, ist es auch möglich, den Testfall als Innenraum zu modellieren, wobei die Konstruktion eine Trennwand zu anderen Innenräumen darstellt. Dabei müssen die benachbarten Innenräume dann entsprechend der geforderten Temperaturkurve beheizt werden, z.B. durch eine ideale Beheizung mit einer Solltemperatur entsprechend des Temperaturverlaufs in Abb. 2.2.

2.2.3 Verlauf der Außenlufttemperatur

Für den Außentemperaturverlauf gilt:

$$T_{out} = \begin{cases} t \leq 168h & 20^\circ C \\ t > 168h \text{ und } t \leq 169h & \text{linearer Verlauf} \\ t > 169h & 30^\circ C \end{cases}$$

In Abb. 2.2 ist das Temperaturänderungsintervall schematisch dargestellt. Innerhalb einer Stunde steigt die Außenlufttemperatur linear an. Die Änderung der Temperatur findet in der ersten Stunde der zweiten Simulationswoche statt, also im Intervall $t = [168h, 169h]$ (siehe Abb. 2.2).

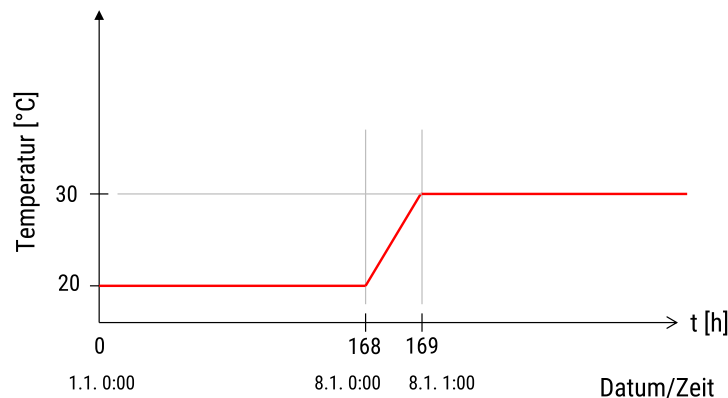


Abbildung 2.2: Verlauf der Außentemperatur mit Änderung im Intervall $t = [168h, 169h]$

Für den Sprung der Außenlufttemperatur wird ein epw-File `SIMQ_TF03_Klima.epw` angeboten, welches bereits den Temperatursprung enthält und die kurzweilige Strahlung auf konstant 0 W/m^2 setzt. Sollte die epw-Datei nicht genutzt werden können, so enthält die Datei `Wetter.ods` (für LibreOffice-Calc/Excel etc.) alle relevanten Daten, um selbst eine Wetter-Datei zu erstellen.

2.2.4 Anfangsbedingung

Die Anfangstemperatur der Innenraumluft sowie der Konstruktionen wird mit $T_{in} = 20^\circ C$ angesetzt.

Anmerkung: Eventuelle Abweichungen von dieser Starttemperatur sollten in den ersten 168 Stunden der Simulation ausgeglichen sein. Die in einigen Programmen möglichen Abweichungen von der geforderten Starttemperatur sind die Hauptmotivation für die Einführung der vorgelagerter Konstantklima-Zeit im Vergleich zur Validierung nach DIN 13791.

3 Ergebnisse

3.1 Regeln für die Berechnung

Die Berechnungsergebnisse der Innenlufttemperatur sollen in Stundenschritten für 31 Tage als Momentanwerte am Stundenende protokolliert werden. Zusätzlich soll gelten:

- 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

Für jede der 4 Prüfvarianten sind stündliche Ausgaben der Raumlufttemperatur auszugeben. Die Innenlufttemperaturen sind mit mind. zwei Nachkommastellen zu bestimmen. Die berechneten Innenraumlufttemperaturen werden zu verschiedenen Zeitpunkten mit den analytisch vorberechneten Werten aus der Norm verglichen. Zusätzlich ist zur Prüfung der Eingabe noch die im Modell verwendete Außenlufttemperatur anzugeben.

Anmerkung: Die Ausgabe der Außenlufttemperatur hilft häufige Eingabefehler wie eine Zeitverschiebung um eine Stunde zu identifizieren.

3.3 Ergebnisdatenablage

Es kann die Ergebnisdatenvorlage `SIMQ_TF03_Wärmeleitung_Ergebnisvorlage.ods` verwendet werden.

Die berechneten Daten sind in einer Datei aufzulisten (ASCII oder Excel oder ähnliches). Die Tabelle soll eine Kopfzeile und danach Datenzeilen wie in folgendem Beispiel (die Spalten sind mit Tabulator-Zeichen getrennt) enthalten¹:

Zeit [h]	T_Out [C]	Variante1 [C]	Variante2 [C]	Variante3 [C]	Variante4 [C]
0	20	20	20	20	20
1	20	20	20	20	20
2	20	20	20	20	20
3	20	20	20	20	20
4	...				

4 Auswertung

Die Innenlufttemperaturen werden 2, 6, 12, 24 und 120 Stunden *nach* dem Temperatursprung² bei $t = 168h$ (d.h. bei Stunde 170, 174, 180, 192 und 288 seit Simulationsbeginn) mit den Sollwerten nach Norm (DIN EN ISO 13791) verglichen. Die Normwerte sind in Tabelle 4.1 angegeben. Zur Prüfung der zeitlichen Dynamik sollten stündliche Ausgaben der Raumlufttemperatur im Zeitintervall 0 bis 360 h (= 15 d) ausgegeben werden. Dies dient auch der Prüfung der Anfangsbedingung.

Eine Abweichung von den Sollwerte bis maximal 0,5 K ist zulässig. Die Zeitangaben in der Tabelle beziehen sich auf die Zeit nach dem Temperatursprung.

Tabelle 4.1: Sollwerte für die Innenlufttemperatur, in °C

Variante	Zeit nach Temperatursprung				
	2h	6h	12h	24h	120h
1	20.04	21.26	23.48	26.37	30.00
2	25.09	29.63	30.00	30.00	30.00
3	20.00	20.26	21.67	24.90	29.95
4	20.00	20.06	20.25	20.63	23.17

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

²Der für die Auswertung relevante *Sprungzeitpunkt* ist der Zeitpunkt $t = 168h$, d.h. der *Beginn* des Änderungsintervalls.