

SimQuality - Validierung der Wärmeleitung und -speicherung in Bauteilen unter dynamischen Randbedingungen

IBK, TU Dresden

6. Januar 2022

Zusammenfassung

Für die Berechnung von Wärmetransportprozessen in der thermischen Gebäudesimulation ist die korrekte Abbildung der dynamischen Wärmeleitung und -speicherung in Abhängigkeit von gegebenen klimatischen Randbedingungen (Außenklima) notwendig. Der nachfolgend beschriebene Testfall prüft diese Funktionalität eines Modells bzw. der Modellimplementierung/Software. Zudem wird die korrekte Wärmetransmission zwischen zwei benachbarten Zonen betrachtet (Mehrzonensimulation).

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlegende Gleichungen	2
2	Aufgabenstellung	2
2.1	Geometrie	2
2.2	Allgemeine Bedingungen	2
2.2.1	Anfangsbedingung	2
2.2.2	Lüftung	2
2.2.3	Übergangskoeffizienten	3
2.3	Prüfvarianten	3
2.3.1	Konstruktionsaufbauten	3
2.3.2	Prüfvariante 1 (04.1): Anstieg der Außentemperatur in einem einstündigen Intervall unter Berücksichtigung der Wärmekapazität der Luft und Innenbauteilen mit erhöhter Wärmekapazität	3
2.3.3	Prüfvariante 2 (04.2) - Wärmeleitung/-speicherung in unterschiedlichen Konstruktionen unter periodischen Sprungbedingungen	5
2.3.4	Prüfvariante 3 (04.3) - Wärmeleitung/-speicherung in gekoppelten Räumen unter periodischen Sprungbedingungen	5
2.3.5	Prüfvariante 4 (04.4) - Wärmeleitung/-speicherung in gekoppelten Räumen unter klimatischen Randbedingungen	6
3	Ergebnisse	7
3.1	Regeln für die Berechnung	7
3.2	Geforderte Ergebnisse	8
3.3	Ergebnisdatenablage	8
4	Auswertung	8

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)

Referenzierte Testfälle

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

2 Aufgabenstellung

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 Umfassungs-konstruktionen statt. Die zu verwendenden Konstruktionsaufbauten sind für die nachfolgend beschriebenen Prüfvarianten jeweils unterschiedlich festgelegt.

Abbildung 2.1 zeigt die Raumgeometrie des Testfalls, mit einem Luftvolumen von $V = 30\text{ m}^3$.

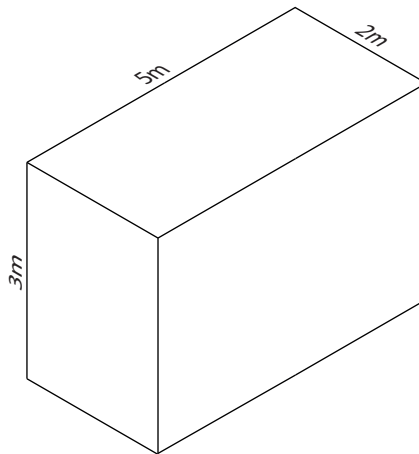


Abbildung 2.1: Raumgeometrie bei Prüfvariante 1

Anmerkung: Die Geometrie entspricht der des TF03, allerdings wird diesmal die Wärmekapazität der Raumluft explizit mit berücksichtigt.

2.2 Allgemeine Bedingungen

2.2.1 Anfangsbedingung

Die Initialtemperatur aller Bauteile und der Raumluft beträgt $T_{initial} = 20^\circ\text{C}$ zum Zeitpunkt $t = 0\text{ h}$.

2.2.2 Lüftung

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

2.2.3 Übergangskoeffizienten

Für die Wärmeübertragungsrandbedingungen sind folgende Modellparameter zu wählen:

- Die Wärmeübertragung kurzwelliger Strahlung wird mit null angesetzt (Absorptionskoeffizient der Außenflächen wird auf null gesetzt).
- 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).
- Der innere konvektive Wärmeübergangskoeffizient jedes Elementes, einschließlich Decke und Fußboden beträgt: $h_{c,i} = 2.5 \frac{W}{m^2 K}$
- Der äußere konvektive Wärmeübergangskoeffizient 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.

2.3 Prüfvarianten

Es werden sowohl Konstruktionsaufbauten als auch klimatische Randbedingungen variiert, sowie Einzonenmodelle und Mehrzonenmodelle getestet. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über alle 4 Prüfvarianten.

Tabelle 2.1: Übersicht über die Prüfvarianten

Variante	Modell	Klima	Konstruktionsaufbau(ten)
04.1	Einzonenmodell	Sprungklima wie in Testfall 03	1, 2
04.2	Einzonenmodell	Periodisches Sprungklima	1, 2
04.3	Zweizonenmodell	Periodisches Sprungklima	1, 3, 4
04.4	Zweizonenmodell	Realklima	1, 3, 4

2.3.1 Konstruktionsaufbauten

Tabelle 2.2 listet die in den nachfolgend beschriebenen Prüffällen verwendeten Konstruktionsaufbauten und Materialeigenschaften auf.

Anmerkung: Die Konstruktionsaufbauten entsprechen den Konstruktionstypen aus SimQuality (TF03).

Tabelle 2.2: Konstruktionsaufbauten und Materialeigenschaften

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

2.3.2 Prüfvariante 1 (04.1): Anstieg der Außentemperatur in einem einstündigen Intervall unter Berücksichtigung der Wärmekapazität der Luft und Innenbauteilen mit erhöhter Wärmekapazität

Die Prüfvariante wird mit 04.1 bezeichnet. Diese Prüfvariante entspricht nahezu dem TF03, Variante 2. Es werden jedoch zwei wesentliche Anpassungen vorgenommen:

- es soll nun die Wärmekapazität der Raumluft betrachtet werden. Es wird von trockener Luft (Dichte ca. 1.2 kg/m^3 und einer Wärmekapazität ca. 1006 J/kgK) ausgegangen. Durch die erhöhte Kapazität verzögert sich der Temperaturanstieg im Raum etwas (siehe auch Bericht zu TF03).
- 3 Konstruktionen (Nord- und Südwand, je 6 m^2 , und der Fußboden mit 10 m^2) sind nun *Innenwände zu einem gleich temperierten Raum* und haben den Konstruktionstyp 1 (massive Wand), alle anderen Konstruktionen haben den Konstruktionstyp 2 (Leichtbauwand).

Anmerkung: 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. Bei Dichteberechnungen in Abhängigkeit des Luftdrucks (Klimadatensatz) sollte die Standorthöhe auf 0 m über Normalnull (0 m ü.NHN) geändert werden¹.

Die Wände haben folgende Konstruktionsaufbauten:

Tabelle 2.3: Zuordnung von Konstruktionstypen zu Flächen

Wand/Fläche	Konstruktionstyp	Randbedingungen	Flächen [m^2]
Fußboden	1	Innenkonstruktion	10
Decke	2	Außenkonstruktion	10
Nordwand	1	Innenkonstruktion	6
Ostwand	2	Außenkonstruktion	15
Südwand	1	Innenkonstruktion	6
Westwand	2	Außenkonstruktion	15

Die Materialeigenschaften für die Konstruktionstypen Nr. 1 und Nr. 2 sind in Tabelle 2.2 gegeben.

Das zu verwendende Klima entspricht dem Außentemperaturverlauf aus SimQuality (TF03), mit Temperaturänderung im Zeitintervall $t = [168h, 169h]$ (siehe Abb. 2.2). Die Wetterdatei SIMQ_TF04_Sprung.epw enthält diesen Temperaturverlauf.

../../../../TF03-Waermeleitung/Aufgabenstellung/img/Sprungklima.pdf

Abbildung 2.2: Verlauf der Außentemperatur bei Prüfvariante 1

Anmerkung zur Modellierung von Innenwänden Die Innenwände sind als Trennwände zwischen sich thermisch gleich verhaltenden Räumen zu behandeln, wovon einer der betrachtete Prüfraum ist. Damit steht jeweils die Hälfte der Wärmekapazität der Innenwand dem Prüfraum zur Verfügung. Sofern die Software eine derartige Modellierung nicht direkt unterstützt, kann ersatzweise eine *halbe* Konstruktion mit Symmetriebedingungen an der Außenseite (adiabat, d.h. keine Wärmeströme) modelliert werden. Es wäre also möglich, statt der Innenwand ersatzweise eine 10 cm starke Außenwand zu modellieren, welche auf der Außenseite einen Wärmeübergangskoeffizient von 0 hat. Ist dies in der Software ebenfalls nicht möglich, so muss die Wärmekapazität der Innenkonstruktionen dem Raumluftknoten zugeschlagen werden. Die Berechnungsvorschrift für diese zusätzliche Kapazität ist entsprechend zu dokumentieren.

¹Siehe https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/publikationen/abteilung07/pub_geobasis_normalhoehen.pdf

2.3.3 Prüfvariante 2 (04.2) - Wärmeleitung/-speicherung in unterschiedlichen Konstruktionen unter periodischen Sprungbedingungen

In dieser Prüfvariante werden alle Bauteile als Außenkonstruktionen definiert. Das Dach bekommt wie bei 04.1 den Konstruktionstyp Nr. 2 zugewiesen (die Dachfläche der Konstruktion beträgt 10 m^2). Alle anderen Konstruktionen sollen aus Konstruktionstyp Nr. 1 bestehen. Dadurch bilden sich im Testraum unterschiedliche Temperaturen an der Innenoberfläche der Dachkonstruktion und den anderen Bauteiloberflächen. Weiterhin wird ein Klima verwendet, welches einen periodischen Temperatursprung aufweist, um dynamische Speichereffekte zu betrachten. Der Temperaturverlauf ist in Datei `SIMQ_TF04_periodisch.epw` abgelegt. Die Temperatur ändert sich innerhalb einer Stunde jeweils linear. Ein Tageszyklus entspricht folgender Festlegung.

Täglich wiederholter Zeitverlauf der Außentemperatur:

$$T_{out} = \begin{cases} t \leq 8:00 & 20^\circ \text{ C} \\ t > 8:00 \text{ und } t \leq 9:00 & \text{linearer Verlauf} \\ t > 9:00 \text{ und } t \leq 18:00 & 30^\circ \text{ C} \\ t > 18:00 \text{ und } t \leq 9:00 & \text{linearer Verlauf} \\ t > 19:00 & 20^\circ \text{ C} \end{cases}$$

Abbildung 2.3 zeigt den Temperaturverlauf an zwei aufeinanderfolgenden Tagen.

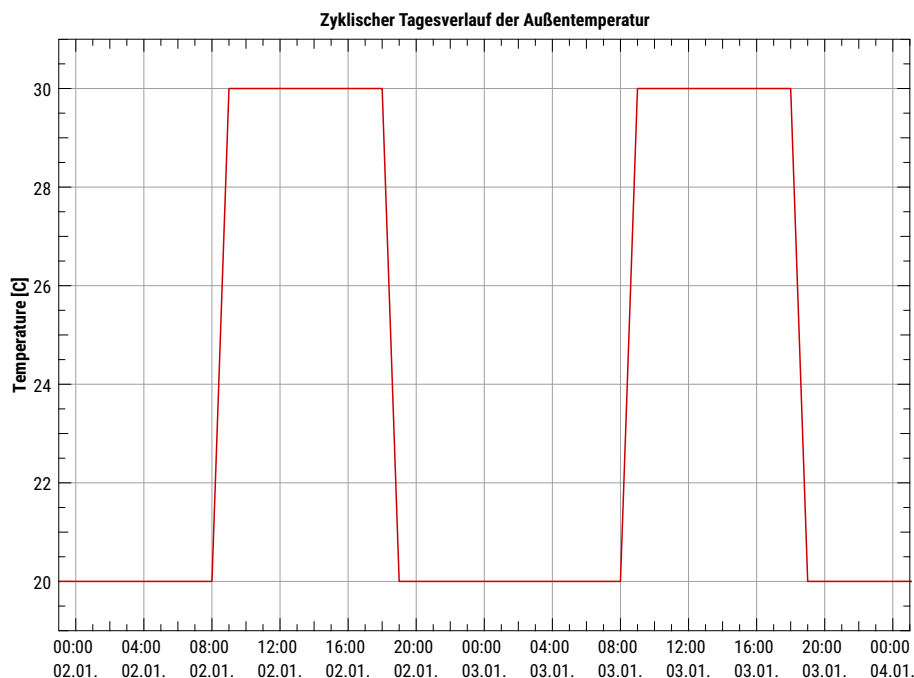


Abbildung 2.3: Verlauf der Außentemperatur mit periodischem Temperatursprung

2.3.4 Prüfvariante 3 (04.3) - Wärmeleitung/-speicherung in gekoppelten Räumen unter periodischen Sprungbedingungen

In Prüfvariante 04.3 werden zwei benachbarte Räume mit den gleichen Raumabmessungen (wie in 04.2) miteinander gekoppelt. Die gemeinsame Innenwandfläche beträgt 15 m^2 (entspricht der $3\text{ m} \times 5\text{ m}$ Wand). Die Räume werden nachfolgend A und B bezeichnet (siehe Abb. 2.4).

Die beiden Räume werden in Ost-West-Richtung nebeneinander angeordnet, sodass eine Außenwand von Raum A nach Osten zeigt, während eine Außenwand von Raum B nach Westen zeigt. Die Ostwand, Westwand und die Trennwand zwischen den Räumen haben jeweils eine Wandfläche von 15 m^2 .

Alle Außenflächen (einschließlich Dach- und Bodenflächen) von Raum A erhalten den Konstruktionstyp 3. Die Innenwand/Trennwand zwischen den Räumen hat den Konstruktionstyp Nr. 1 (massive Wand). Alle Außenflächen von B (einschließlich Dach- und Bodenflächen) sollen den Konstruktionstyp Nr. 4 verwenden. Die Konstruktionszuweisungen sind in Tab. 2.4 als Erläuterung zu Abb. 2.4 noch einmal aufgelistet.

Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten sind wie in den Prüfvarianten 04.1 und 04.2 zu wählen, wobei die Innenwand zu beiden Seiten einen konvektiven Wärmeübergangskoeffizient von $h_{c,i} = 2.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ erhält.

Die Wahl der Konstruktionen bewirkt ein unterschiedliches thermisches Verhalten beider Räume. In Raum A grenzt der Raumluftknoten an eine leichte und schlecht leitfähige Bauteilschicht auf der Innenseite. In Raum B berührt die massive 20 cm starke Materialschicht mit hoher Dichte und Wärmeleitfähigkeit direkt den Raumluftknoten. Obwohl beide Konstruktion den gleichen U-Wert aufweisen, wirkt sich die Reihenfolge der Bauteile stark auf die berechneten Raumlufttemperaturen aus.

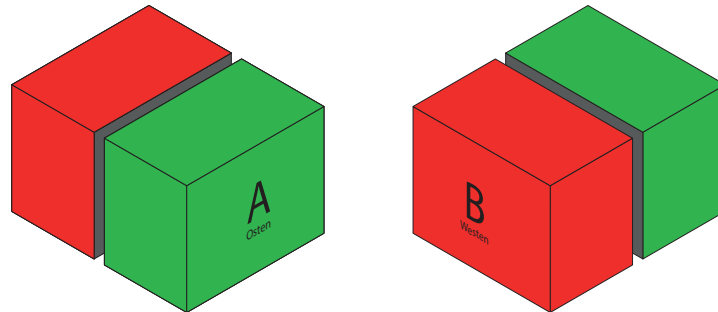


Abbildung 2.4: Zuweisung der Konstruktionen der beiden Testräume

Tabelle 2.4: Zuordnung der Konstruktionen in Skizze 2.4 für die Prüfvarianten 04.3 und 04.4.

Konstruktionstyp	Zuweisung	Konstruktion
1		Innenwand
3		alle Außenflächen Raum A
4		alle Außenflächen Raum B

Anmerkung: Die Ausrichtung der Räume ist für diesen Testfall nicht wichtig. Das Modell kann aber für spätere Modellierung nachgenutzt werden und sollte deshalb mit der beschriebenen Ost-West-Ausrichtung erstellt werden.

2.3.5 Prüfvariante 4 (04.4) - Wärmeleitung/-speicherung in gekoppelten Räumen unter klimatischen Randbedingungen

Die Variante 04.4 basiert auf der Prüfvariante 04.3. Es wird lediglich die Klimarandbedingung verändert. Dafür wird der Jahresverlauf der Außentemperatur entsprechend des Klimadatensatzes für den Standort „Potsdam“ aus der Datei `SIMQ_Potsdam.epw` verwendet. Der Räume/bzw. das Gebäude befindet sich auf einer geografischen Höhe von $H = 81\text{ m}$ (dies entspricht 81 m ü.NHN).

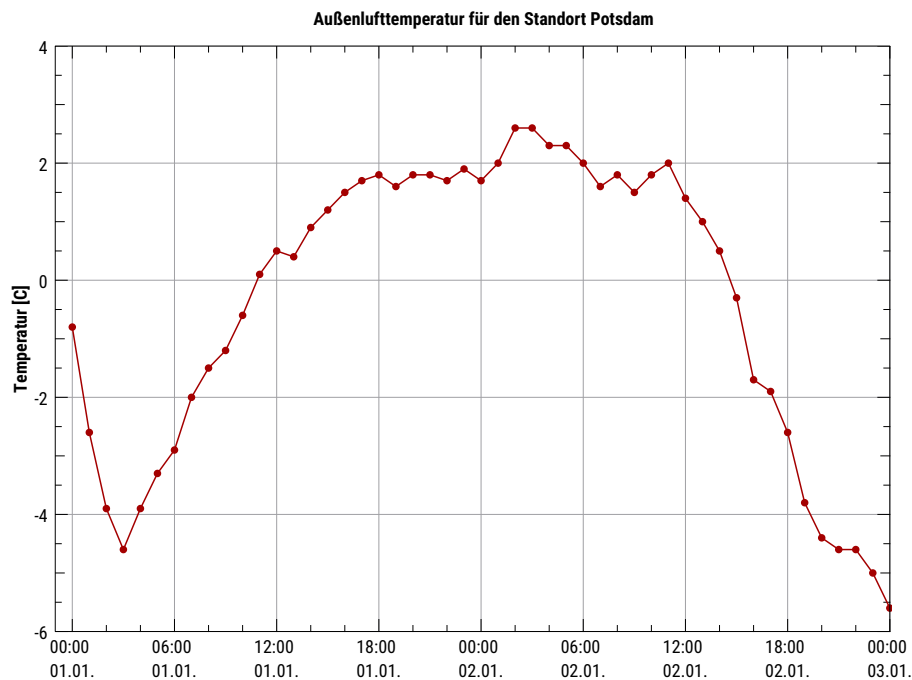


Abbildung 2.5: Außenlufttemperaturverlauf in den ersten 2 Tagen für den Standort „Potsdam“. Beispiel für die korrekte Interpretation der Wetterdatei.

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

Anmerkung: Für die Verwendung in Prüfvariante 04.4 soll die EPW-Wetterdatei wie folgt interpretiert werden.

Der erste Dateneintrag der EPW-Wetterdatei

2001,1,1,1,60,B8E7B8B8?9?0?0?0?0?0B8B8B8B8?0?0F8F8A7E7, -2.6,-3.6,93,100530,9999,1400,251,0,0,0,...

beschreibt das Zeitintervall von 00:01 bis 01:00 Uhr. Ein Momentanwert, wie die Außenlufttemperatur, ist immer dem Ende des Intervals zuzuordnen. Das bedeutet, dass der erste Eintrag den Momentanwert zum Zeitpunkt 01:00 Uhr zuordnet und damit in unserem Fall bei $t = 1\text{ h}$ die Außenluft $T_{out} = -2.6^\circ\text{C}$ beträgt. Für den Zeitpunkt $t = 0\text{ h}$ ist der *letzte* Eintrag der EPW-Wetterdatei zu verwenden, da ein zyklischer Datensatz vorliegt. Der Verlauf der Außenlufttemperatur wird in Abb. 2.5 beispielhaft für die ersten 2 Tage des Jahres dargestellt.

Anmerkung: Einige Simulationsprogramme (wie z.B. Modelica) verwenden für die gesamte erste Stunde die Wetterdaten vom Zeitpunkt $t = 1 \text{ h}$. Dies führt zu kleineren Abweichungen der Berechnungsergebnisse innerhalb der ersten Stunden bzw. Tage.

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 der Innenlufttemperatur sollen in Stundenschritten als *Momentanwert* für das ganze Jahr 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 Geforderte Ergebnisse

Für jede der 4 Prüfvarianten sind stündliche Ausgaben der Raumlufttemperatur auszugeben. Die Innenlufttemperaturen sind mit mind. zwei Nachkommastellen zu bestimmen. Zusätzlich ist zur Prüfung der Eingabe noch die im Modell verwendete Außenlufttemperatur anzugeben.

3.3 Ergebnisdatenablage

Es kann die Ergebnisdatenvorlage `SIMQ_TF04_Wärmeleitung+Speicherung_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) enthalten²:

Zeit [h]	Außenlufttemperatur [C]	Lufttemperatur, Raum A [C]	Lufttemperatur, Raum B [C]
0	-0.8	20.00	20.00
1	-2.6	20.00	20.00
2	-3.9	20.00	20.00
3	-4.6	20.00	20.00
4	-3.9	20.00	20.00
5	...		

4 Auswertung

Zur Auswertung 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 02 bis 04 bilden sich folgende (noch zu diskutierende) Bewertungskriterien:

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

²Hinweis: Eine solche Datei erhält man automatisch, wenn man einen entsprechenden Inhalt einer Excel-Tabelle markiert und mittels Kopieren+Einfügen in einen Texteditor kopiert.