

# 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

<b>1</b>	<b>Tools, Berechnungsvarianten und Bemerkungen</b>	<b>2</b>
1.1	Tools . . . . .	2
1.2	Probleme bei der Durchführung . . . . .	2
1.3	Vergleich mit TF03 . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>3</b>
2.1	Variante 1 . . . . .	3
2.2	Variante 2 . . . . .	4
2.3	Variante 3 . . . . .	5
2.4	Variante 4 . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Bewertung</b>	<b>9</b>

# 1 Tools, Berechnungsvarianten und Bemerkungen

## 1.1 Tools

**Tabelle 1.1:** Übersicht über die verwendeten Programme für die Berechnung der solaren Lasten

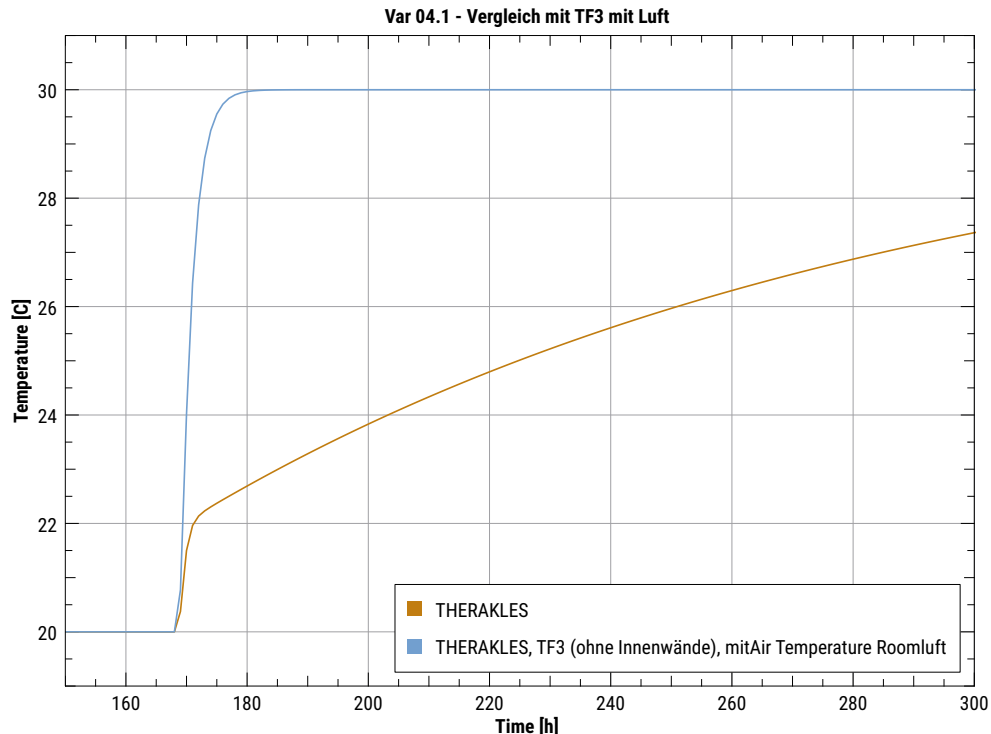
Programm	Version	Bearbeiter
NANDRAD	1.4	Stephan Hirth, IBK TU Dresden
IDA ICE	4.8.0.1	Caroline Seifert, INNIUS DÖ
TRNSYS	18	Julian Agudelo, Hochschule München
THERAKLES	3.4.0	Andreas Nicolai, IBK TU Dresden
ETU-Simulation	5.1.x.19	Rainer Rolfs, ETU Hottgenroth
Modelica/AixLib	Dymola Version 4.1 AixLib Version 0.7.3	Amin Nouri, RWTH Aachen
TAS	9.5.0	Rainer Strobel, PGMM

## 1.2 Probleme bei der Durchführung

- Erzeugung adiabater Randbedingungen anliegend am Bauteil (kein Wärmestrom über Symmetrieebene)
- Korrekte Parametrisierung der Konstruktionen (schwere und leichte Bauteilmasse)
- Korrekte Solvereinstellungen zur Vermeidung von Schwingungen

## 1.3 Vergleich mit TF03

Nachfolgend findet sich in Abb. 1.1 ein Vergleich zwischen Testfall 03 Variante 02 und dem Testfall 04 Variante 01, um den qualitativen Unterschied zu verdeutlichen, den adiabate Innenwände erzeugen. So zeigt sich, dass die Wände erst mit Versatz beladen werden.



**Abbildung 1.1:** Vergleich der geforderten Ergebnisse von Testfall 03 mit Prüfvariante 04.1 (adiabte Innenflächen)

## 2 Ergebnisse

Es werden die zeitlichen Verläufe der Lufttemperatur dargestellt.

### 2.1 Variante 1

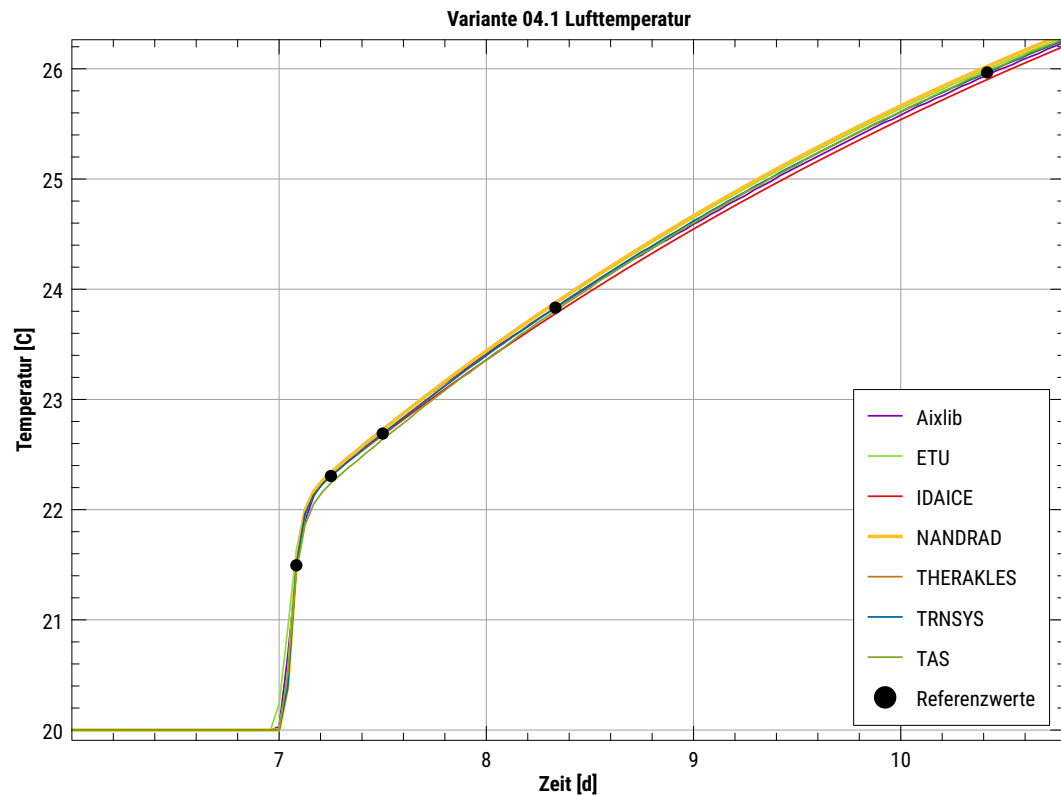
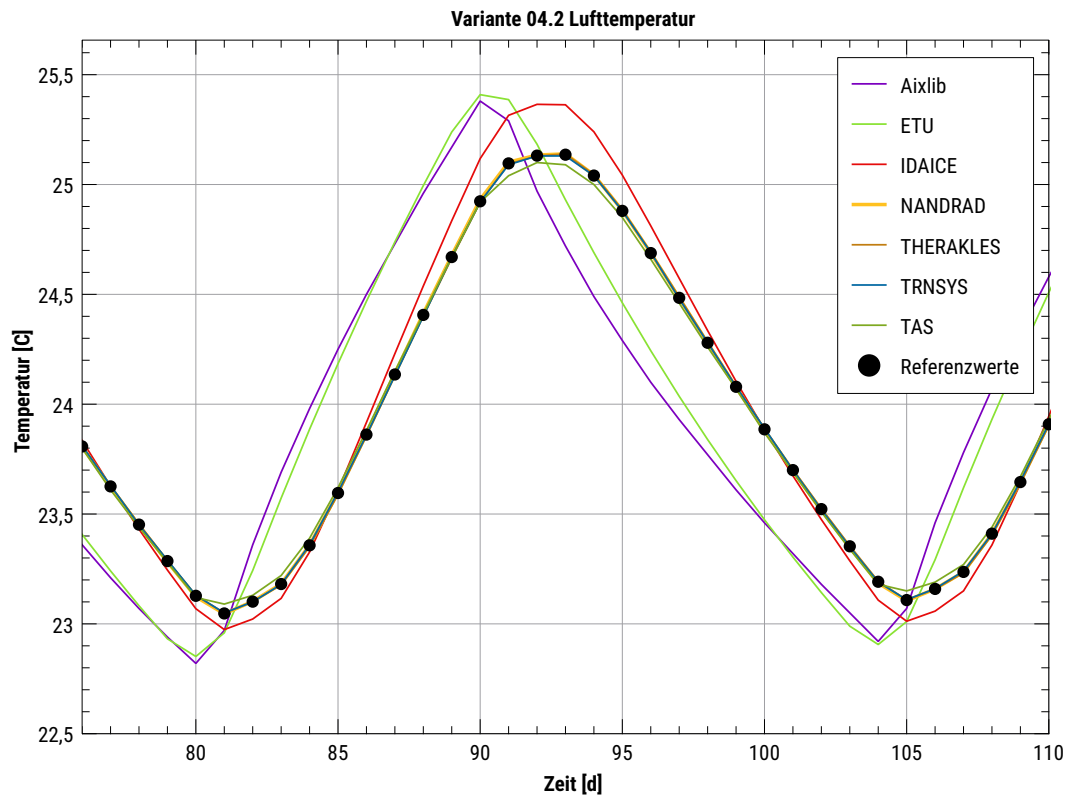
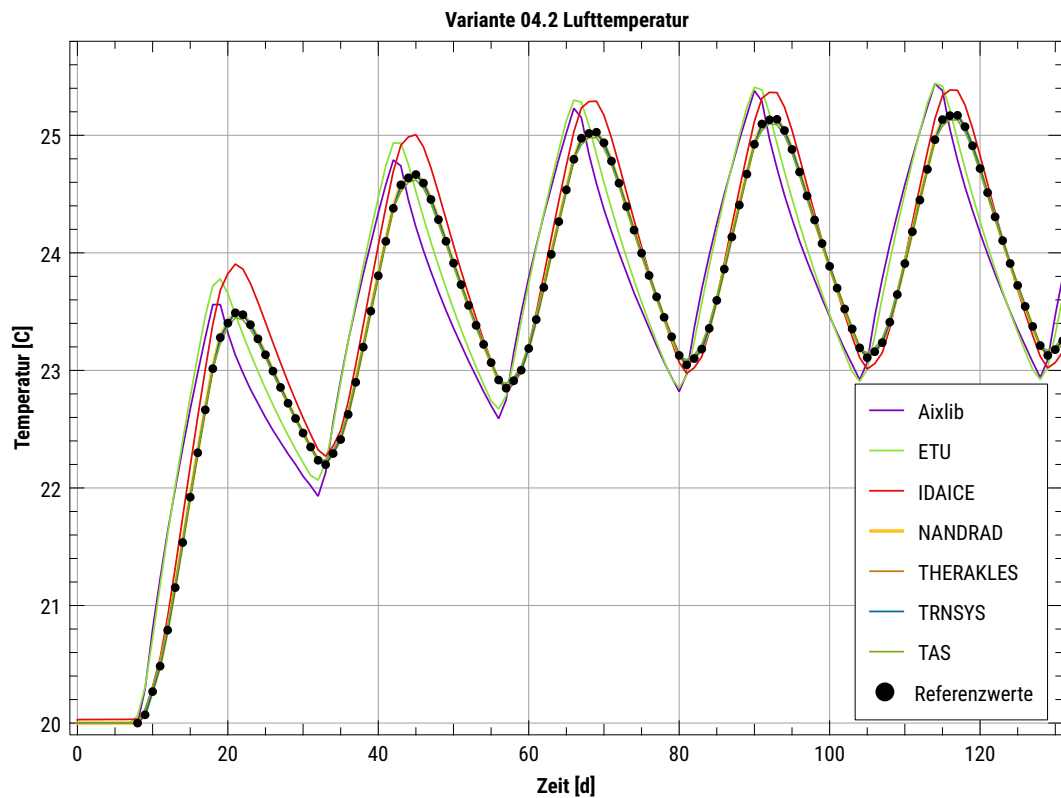


Abbildung 2.1: Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.1(adiabte Innenflächen)

## 2.2 Variante 2



**Abbildung 2.2:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.2 (unterschiedliche Bauteilmassen) im eingeschwungenen Zustand



**Abbildung 2.3:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.2 (unterschiedliche Bauteilmassen) für den gesamten Zeitraum

## 2.3 Variante 3

Nachfolgend wird Abb. 2.5 der Temperaturverlauf für die Raumluft für Prüfvariante 04.3 Raum A (leichte Konstruktion) für den gesamten Zeitraum und in Abb. 2.4 für den Startbereich und im eingeschwungenen Zustand dargestellt.

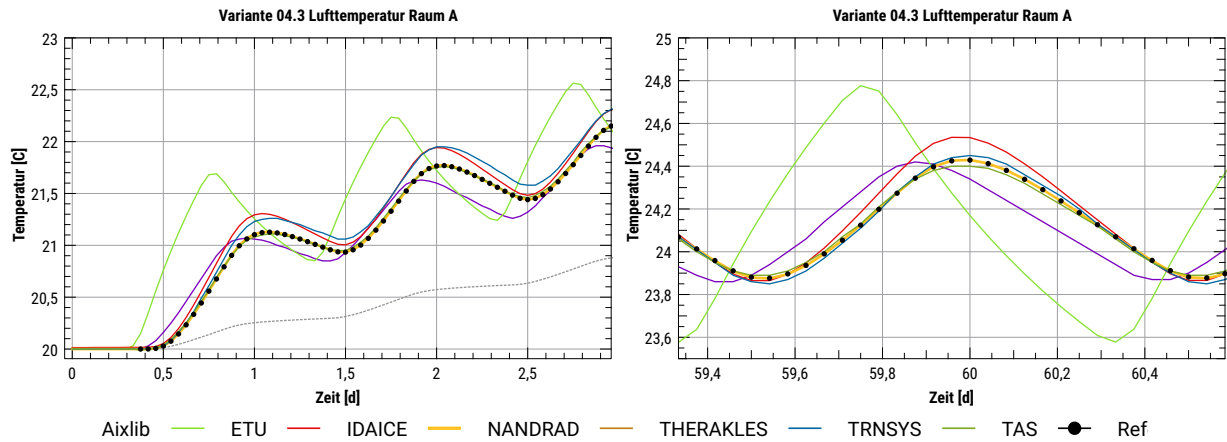


Abbildung 2.4: Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.3 Räume A (leichte Konstruktion) - im Startbereich und im eingeschwungenen Zustand

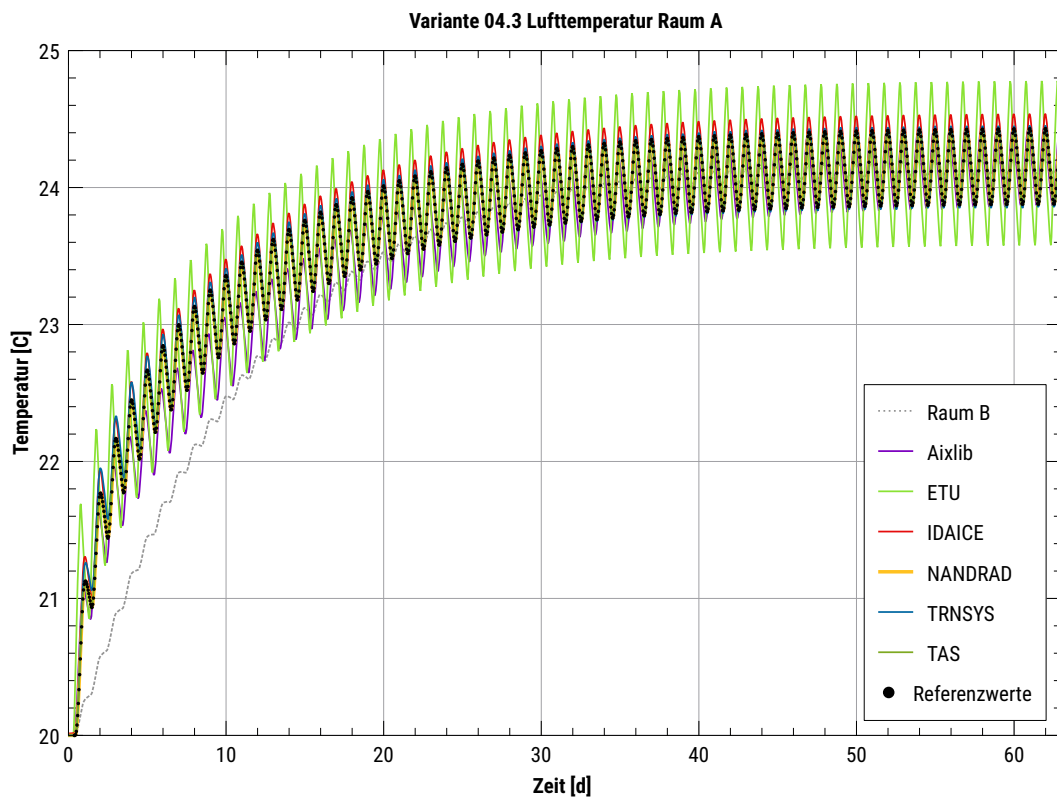
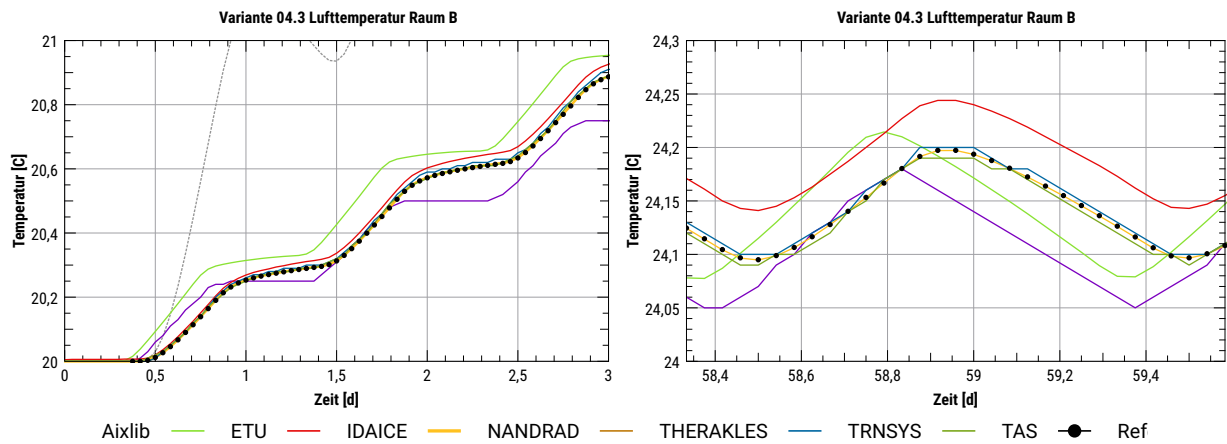
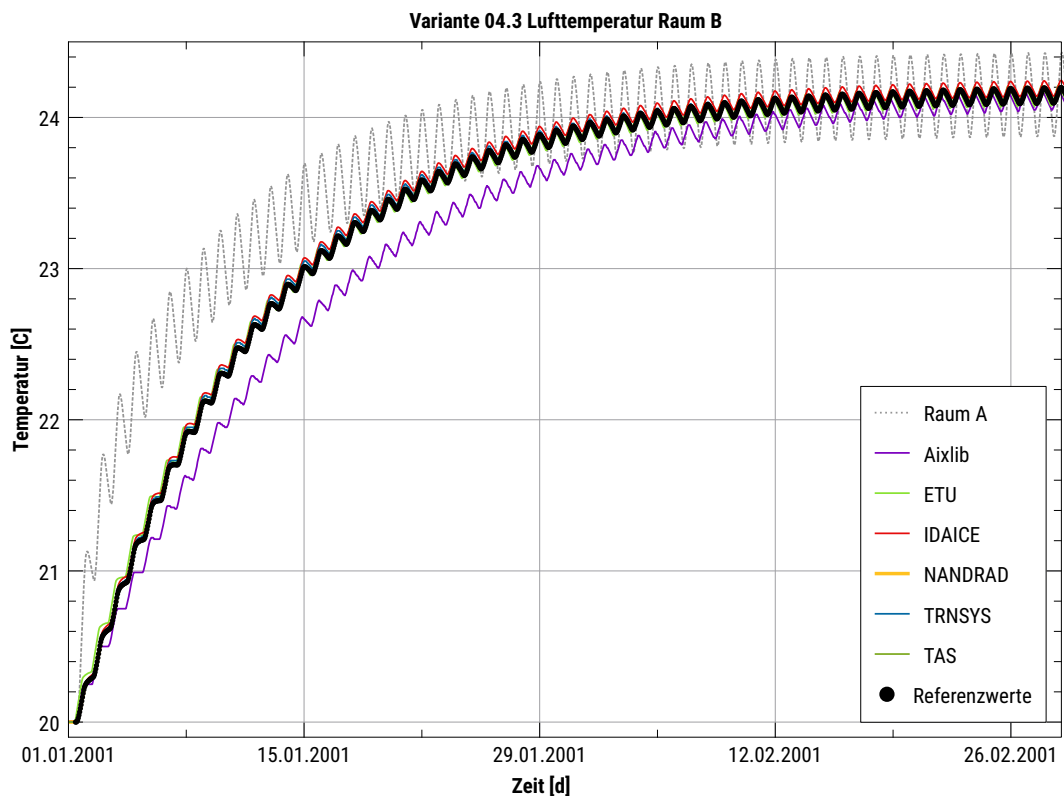


Abbildung 2.5: Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.3 Räume A (leichte Konstruktion) für den gesamten Zeitraum

Nachfolgend wird Abb. 2.7 der Temperaturverlauf für die Raumluft für Prüfvariante 04.3 Raum B (schwere Konstruktion) für den gesamten Zeitraum und in Abb. 2.6 für den Startbereich und im eingeschwungenen Zustand dargestellt.



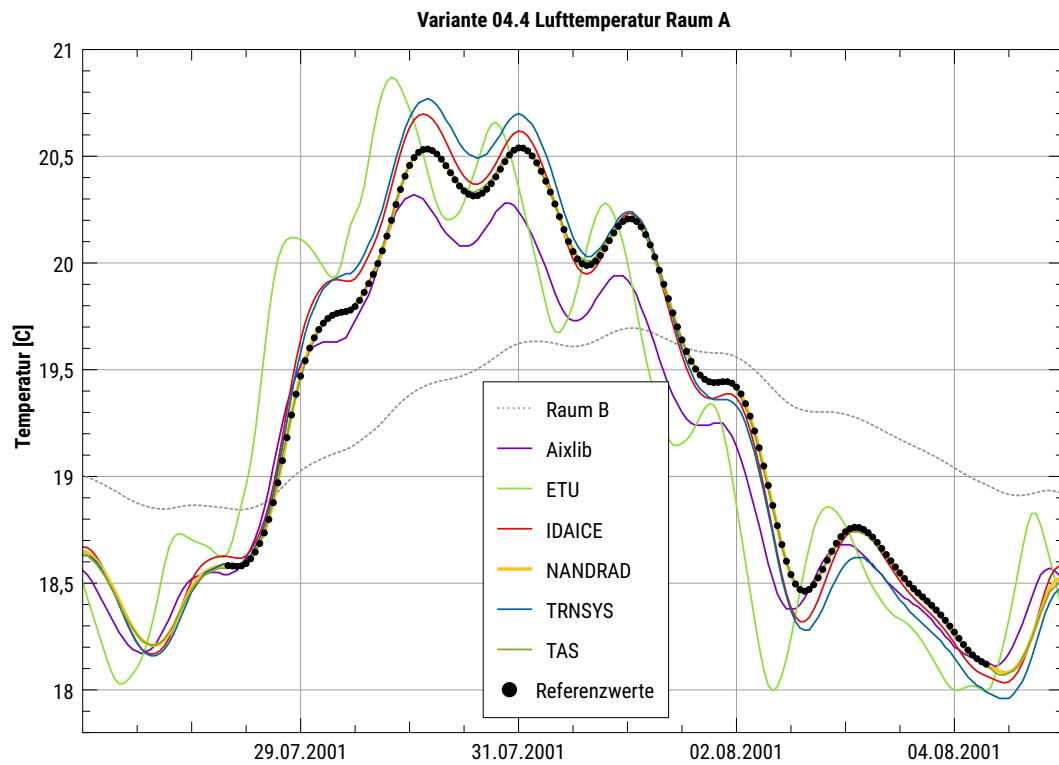
**Abbildung 2.6:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.3 Räume B (schwere Konstruktion) - im Startbereich und im eingeschwungenen Zustand



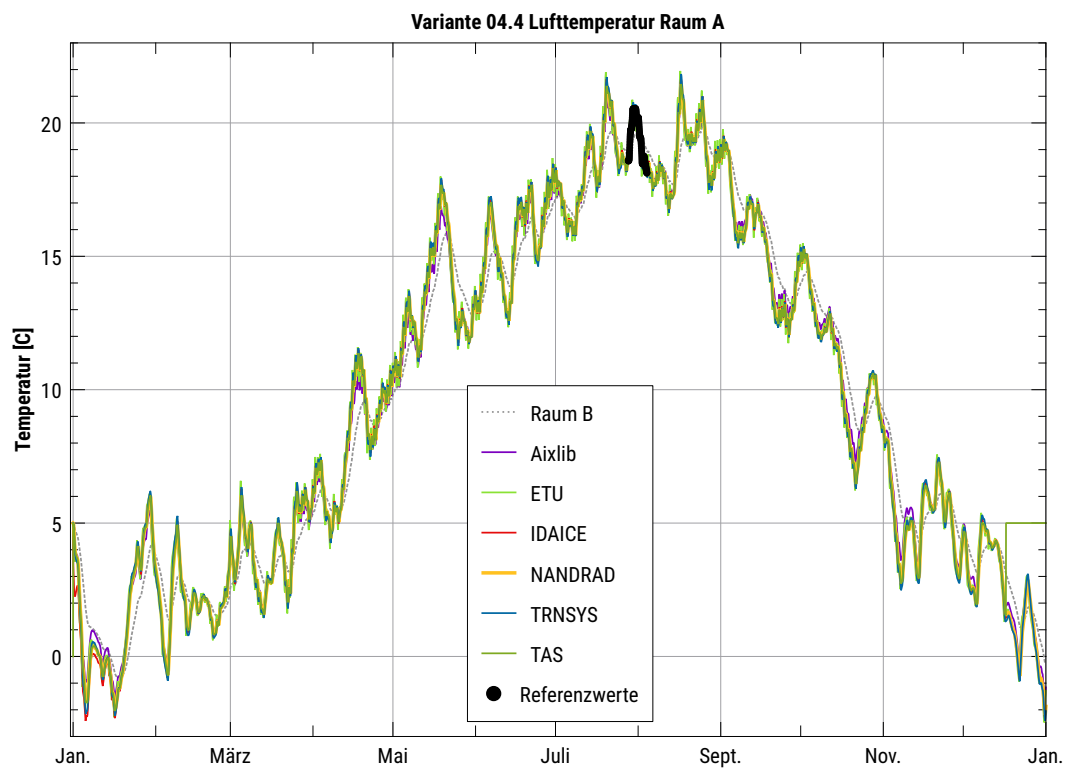
**Abbildung 2.7:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.3 Räume B (schwere Konstruktion) für den gesamten Zeitraum

## 2.4 Variante 4

Nachfolgend wird Abb. 2.9 der Temperaturverlauf für die Raumluft für Prüfvariante 04.4 Raum A (leichte Konstruktion) für den gesamten Zeitraum und in Abb. 2.6 für die überprüfte Sommerwoche dargestellt.

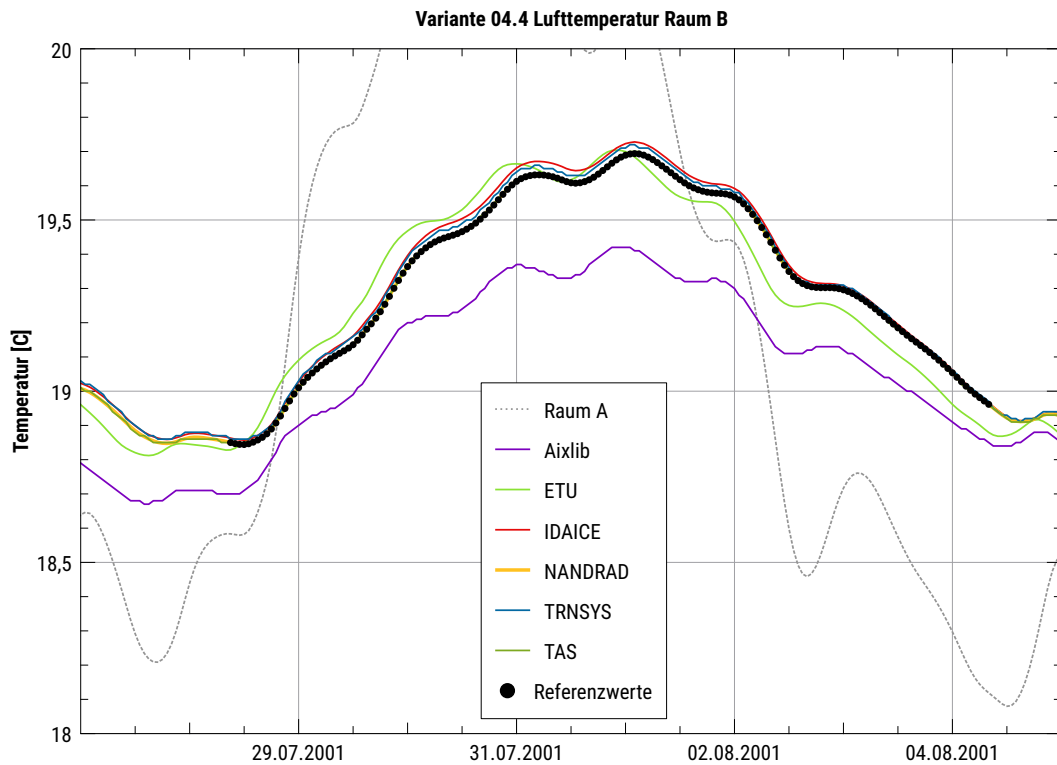


**Abbildung 2.8:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.3 Räume A (leichte Konstruktion) - in der Sommerwoche

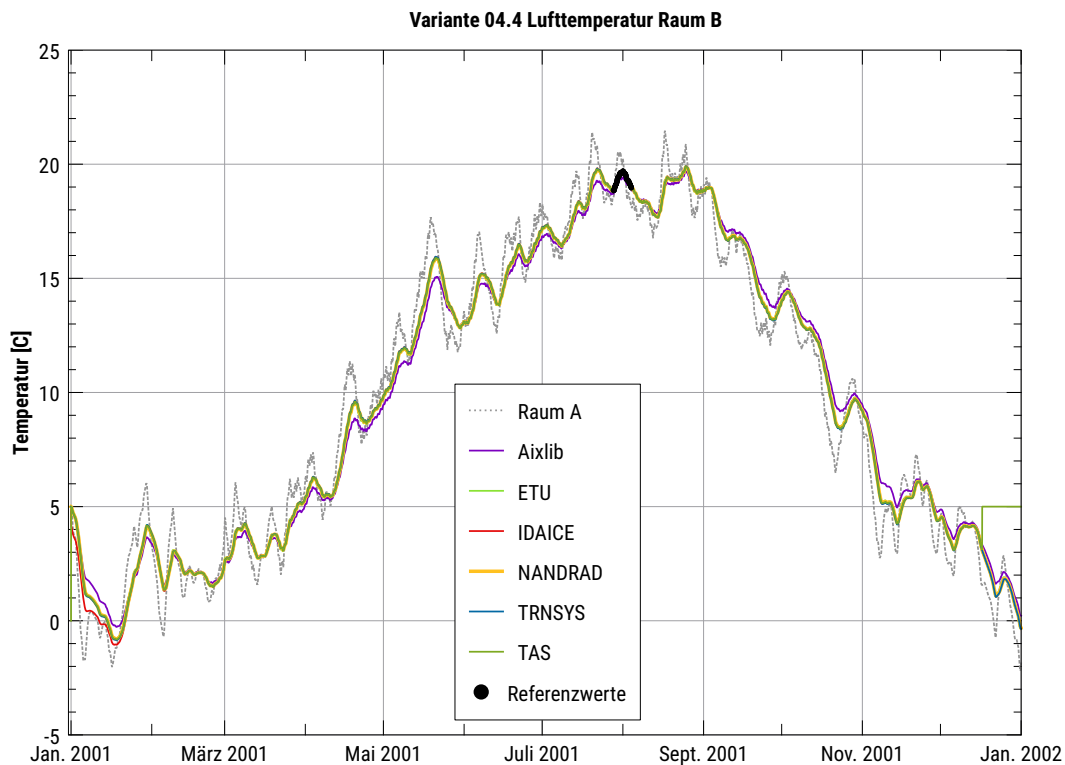


**Abbildung 2.9:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.3 Räume A (leichte Konstruktion) - im gesamten Prüffahr

Nachfolgend wird Abb. 2.9 der Temperaturverlauf für die Raumluft für Prüfvariante 04.4 Raum B (schwere Konstruktion) für den gesamten Zeitraum und in Abb. 2.6 für die überprüfte Sommerwoche dargestellt.



**Abbildung 2.10:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.4 Räume B (schwere Konstruktion) - in der Sommerwoche



**Abbildung 2.11:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 04.4 Räume B (schwere Konstruktion) - im gesamten Prüffahr



### 3 Auswertung

Bezüglich der Ergebnisse sind einige Differenzen festzustellen. Dies liegt einerseits an unterschiedlichen Wand-Ersatzmodellen, die bei den nun vorliegenden Randbedingungen zu deutlich höheren Abweichungen führen. Durch die exakte Finite-Volumen-Methode in NANDRAD und THERAKLES zeigt sich auch in diesen Testfällen eine hohe Übereinstimmung mit TRNSYS. ETU Simulation und Aixlib aber auch TAS zeigen in diesem Testfall erhöhte Abweichungen, die unter Abschnitt 4 weiter diskutiert werden. Zur weiteren Bewertung der einzelnen Programme dient die Raumlufttemperatur am Stundenende.

### 4 Bewertung

Um die Programme qualitativ bewerten zu können, werden unterschiedliche Methoden verwendet. Für Prüfvariante 01 wird als Validierungskriterium eine maximale Abweichung analog zu Testfall 03 von  $0.5 K$  gewählt. Als Referenz wird das Programm gewählt, das in Testfall 03 in Bezug auf die analytische Lösung die geringsten Abweichungen aufwies. Dies ist neben NANDRAD auch THERAKLES. Da THERAKLES nur ein Ein-Zonen-Simulationsporgramm ist, wird NANDRAD als Referenz für die nachfolgenden Testfälle verwendet. In Prüfvariante 01 wird das Prüfkriterium von allen Testprogrammen eingehalten. Dabei weisen THERAKLES und TRNSYS die geringsten Abweichungen auf. Aixlib und IDA ICE haben ebenso geringe Abweichungen. TAS und ETU Simulation kennzeichnen sich in dieser Prüfvariante durch die größten Abweichungen zur Referenz, halten jedoch ohne Probleme das Prüfkriterium ein

In den nachfolgenden Testfällen, in denen ein dynamischer Temperaturverlauf betrachtet wird, werden statistische Kennwerte gewählt, um die Übereinstimmung der Programme zu analysieren. 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 02 bis 04 bilden sich folgende (noch zu diskutierende) Bewertungskriterien:

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

**Tabelle 4.1:** Bewertung für Variante 01 - Raumlufttemperatur

<b>Variante 01</b>	<b>170.0 h</b>	<b>174.0 h</b>	<b>180.0 h</b>	<b>200.0 h</b>	<b>250.0 h</b>	<b>500.0 h</b>
Aixlib	21.462	22.338	22.733	23.829	25.941	29.529
ETU	21.634	22.339	22.724	23.866	25.996	29.525
IDAICE	21.513	22.308	22.678	23.778	25.902	29.588
NANDRAD	21.495	22.305	22.691	23.833	25.967	29.518
TAS	21.810	22.250	22.630	23.770	25.910	29.490
THERAKLES	21.500	22.305	22.690	23.832	25.967	29.518
TRNSYS	21.500	22.310	22.690	23.830	25.970	29.520
<b>Difference</b>	<b>170.0 h</b>	<b>174.0 h</b>	<b>180.0 h</b>	<b>200.0 h</b>	<b>250.0 h</b>	<b>500.0 h</b>
Aixlib	0.033	0.033	0.042	0.004	0.026	0.011
ETU	0.139	0.033	0.034	0.033	0.029	0.007
IDAICE	0.018	0.003	0.013	0.055	0.065	0.070
NANDRAD	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
TAS	0.315	0.055	0.061	0.063	0.057	0.028
THERAKLES	0.005	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
TRNSYS	0.005	0.005	0.000	0.003	0.003	0.002

Nur wenn beide Kriterien erfüllt sind, gilt das Programm für die jeweilige Prüfvariante als validiert. Für Prüfvariante 02 erfüllen alle Programme außer Aixlib das Prüfkriterium. Lediglich ETU Simulation hat einen  $R^2$ -Wert nur knapp über 80%.

**Tabelle 4.2:** Bewertung für Variante 02 - Raumlufttemperatur

<b>Variante 02</b>	<b>RMSE</b>	<b>nRMSE</b>	<b>CV(RMSE)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Aixlib	0.49	0.09	2.07%	78.8%
ETU	0.45	0.08	1.89%	82.6%
IDAICE	0.18	0.03	0.74%	97.5%
NANDRAD	0.00	0.00	0.00%	100.0%
TAS	0.26	0.05	1.10%	93.3%
THERAKLES	0.00	0.00	0.02%	100.0%
TRNSYS	0.00	0.00	0.02%	100.0%

Bei Prüfvariante 03 wird ein Raum mit leichter Bauteilmasse mit einem Raum mit schwerer Bauteilmasse gekoppelt. Dabei gibt es für beide Räume jeweils ein Prüfkriterium, das eingehalten werden muss. Es zeigt sich, dass für Raum B mit schwerer Bauteilmasse alle Programme das Prüfkriterium einhalten. Bei Raum A halten alle Programme bis auf ETU Simulation mit einem  $R^2$ -Wert von nur ca. 61% das Prüfkriterium ein.

**Tabelle 4.3:** Bewertung für Variante 03 - Raumlufttemperatur

<b>Variante 03 - Raum A</b>	<b>RMSE</b>	<b>nRMSE</b>	<b>CV(RMSE)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Aixlib	0.18	0.04	0.75%	93.7%
ETU	0.43	0.09	1.80%	61.5%
IDAICE	0.07	0.02	0.28%	98.9%
NANDRAD	0.00	0.00	0.00%	100.0%
TAS	0.08	0.02	0.33%	98.4%
TRNSYS	0.04	0.01	0.15%	99.7%
<b>Variante 03 - Raum B</b>	<b>RMSE</b>	<b>nRMSE</b>	<b>CV(RMSE)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Aixlib	0.16	0.04	0.67%	97.1%
ETU	0.04	0.01	0.18%	99.8%
IDAICE	0.05	0.01	0.20%	99.7%
NANDRAD	0.00	0.00	0.00%	100.0%
TAS	0.04	0.01	0.15%	99.8%
TRNSYS	0.02	0.00	0.07%	100.0%

Bei Prüfvariante 04 werden die in Prüfvariante 03 gekoppelten Räumen mit einem realen Klimadatensatz simu-

liert. Hier werden erneut beide Räume ausgewertet und die Prüfkriterien jeweils für den Raum getestet. Dabei wird lediglich eine Sommerwoche 28. Juli bis 4. August ( $5000 \leq h < 5168$ ) betrachtet. Bei Raum A halten alle Programme bis auf ETU Simulation das Prüfkriterium ein. Bei Raum B halten auch alle Programme bis auf Aixlib das Prüfkriterium ein.

**Tabelle 4.4:** Bewertung für Variante 04 - Raumlufttemperatur

<b>Variante 04 - Raum A</b>	<b>RMSE</b>	<b>nRMSE</b>	<b>CV(RMSE)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Aixlib	0.22	0.10	1.13%	90.2%
ETU	0.43	0.15	2.24%	76.1%
IDAICE	0.09	0.04	0.47%	98.8%
NANDRAD	0.00	0.00	0.00%	100.0%
TAS	0.06	0.02	0.32%	99.4%
TRNSYS	0.14	0.05	0.70%	97.7%

<b>Variante 04 - Raum B</b>	<b>RMSE</b>	<b>nRMSE</b>	<b>CV(RMSE)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Aixlib	0.21	0.29	1.11%	-15.8%
ETU	0.07	0.08	0.38%	92.2%
IDAICE	0.03	0.03	0.14%	99.0%
NANDRAD	0.00	0.00	0.00%	100.0%
TAS	0.01	0.01	0.06%	99.8%
TRNSYS	0.02	0.02	0.10%	99.5%

Für den Testfall 04 lässt sich zusammenfassend sagen, dass Aixlib und ETU Simulation 4/6 Prüfkriterien erfüllen. IDA ICE, NANDRAD sowie TAS und TRNSYS halten 6/6 Prüfkriterien ein. THERAKLES hält in diesem Fall nur die beiden Fälle (also 2/2) ein, in denen ein Ein-Zonen-Modell überprüft wird.