

# SimQuality - Validierung der Wärmeleitung durch opake Elemente

IBK, TU Dresden

27. April 2022

## Zusammenfassung

Für die Berechnung von Wärmetransportprozessen in der thermischen Gebäudesimulation ist die korrekte Abbildung der Wärmeleitung durch opake Elemente notwendig. Der nachfolgend beschriebene Testfall prüft die Funktionalität eines Modells bzw. die Modellimplementierung/Software hinsichtlich der Berechnung der instationären Wärmeleitung durch opake Bauteile.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Tools, Berechnungsvarianten und Bemerkungen</b>	<b>2</b>
1.1	Tools . . . . .	2
1.2	Probleme bei der Modellierung/Durchführung der Prüffälle . . . . .	2
1.3	Interpretation und Anwendung des Außenklimaverlaufs . . . . .	2
1.4	Interpretation und Auswertung von Stundenmittelwerten als Ausgaben . . . . .	3
1.5	Einfluss der Wandmodellgenauigkeit . . . . .	4
1.6	Einfluss der Zeitintegrationsschrittweite . . . . .	5
1.7	Einfluss der Berücksichtigung der Raumlufthärmekapazität . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>8</b>
2.1	Zeitliche Verläufe . . . . .	8
2.2	Vergleich mit Referenzwerten . . . . .	10
2.3	Programmspezifische Anmerkungen . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Bewertung der Tools</b>	<b>10</b>

# 1 Tools, Berechnungsvarianten und Bemerkungen

## 1.1 Tools

**Tabelle 1.1:** Übersicht über die verwendeten Programme

Programm	Version	Bearbeiter
NANDRAD	1.4	Dirk Weiß, IBK TU Dresden
THERAKLES	3.3.1	Andreas Nicolai, IBK TU Dresden
IDA ICE	4.8.0.1	Stephan Lehr/Caroline Seifert, INNIUS DÖ
TRNSYS	18	Julian Agudelo, Hochschule München
ETU / Hottgenroth	4.1	Rainer Rolfs, ETU Hottgenroth
Modelica	Dymola 4.1 / AixLib 0.7.3	Amin Nouri, RWTH Aachen
TAS	9.5.0	Rainer Strobel, PGMM

## 1.2 Probleme bei der Modellierung/Durchführung der Prüffälle

Einige Simulationsprogramme verwenden außenseitig funktionale Ansätze, um den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten automatisch aus gegebener Windrichtung und Windgeschwindigkeit zu berechnen. Bei diesen Programmen ist es nicht direkt möglich, feste Werte für die außenseitigen Übergangskoeffizienten wie in der Aufgabenstellung gefordert anzugeben.

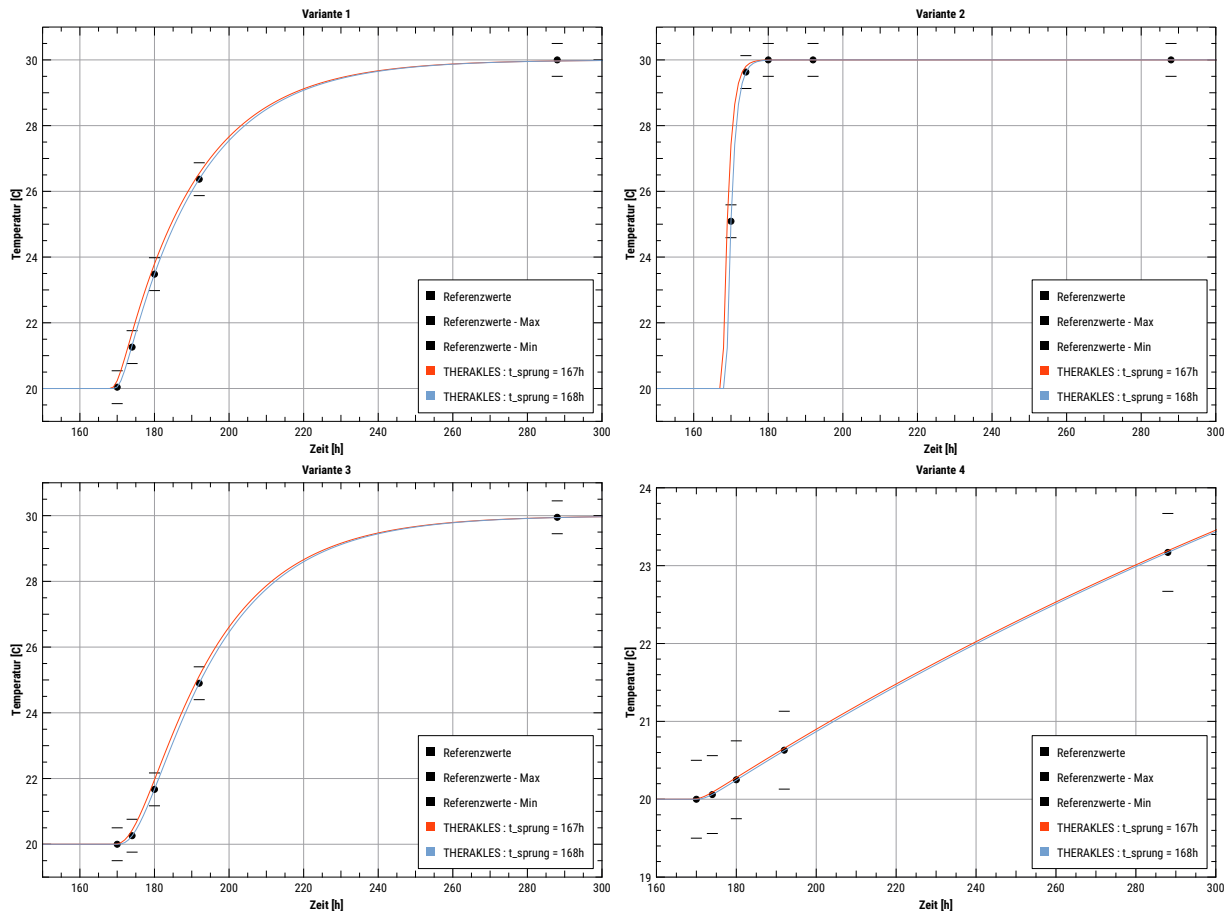
Ein Lösungsansatz bestand darin, die Windgeschwindigkeiten entsprechend der Umrechnungsformel so im Klimadatensatz anzugeben, dass für im Programm die geforderten Übergangskoeffizienten berechnet werden. Dies war jedoch bei einigen Programmen nicht ausreichend, da diese zudem eine ausrichtungsabhängige Berechnung durchführen, wodurch nur jeweils eine Wandfläche die richtigen Übergangskoeffizienten erhält. Dennoch waren die äußeren Übergangskoeffizienten auch bei diesen Programmen nahe der geforderten  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Eine weitere Lösung für das Problem mit den außenseitigen Übergangskoeffizienten bestand darin, den Prüfraum als komplett innenliegenden Raum zu modellieren. In den umgebenden Räumen konnte dann das geforderte Lufttemperaturprofil z.B. über eine ideal geregelte Beheizung eingestellt werden.

## 1.3 Interpretation und Anwendung des Außenklimaverlaufs

Eine Schwierigkeit bei diesem Testfall besteht in der korrekten Umsetzung des geforderten Außenklimaverlaufs. Zum einen gibt es Programme, welche je Stunde nur Konstantwerte erlauben. Hier musste lineare Verlauf im Sprungintervall durch den konstanten Mittelwert  $25^\circ\text{C}$  in dem Sprungintervall  $t = [168h, 169h]$  ersetzt werden. Dadurch kommt es zu Abweichungen in den Ergebnissen.

Durch die sehr groß gewählten Toleranzen in den Prüfkriterien ist eine fehlerhafte Eingabe des Temperatursprungintervalls auch nur in der Prüfvariante 2 erkennbar, welches zu Fehlinterpretation der Berechnungsergebnisse geführt hat. Abbildung 1.1 zeigt für das Programm THERAKLES (welches die analytische Lösung sehr exakt reproduzieren kann) zwei Berechnungsvarianten: einmal mit korrektem Temperatursprung im Intervall  $t = [168h, 169h]$ , und einmal die Variante mit Temperaturänderung im Intervall  $t = [167h, 168h]$ , d.h. eine Stunde vorher.



**Abbildung 1.1:** Vergleich der Ergebnisse bei Simulationen mit korrektem Temperaturänderungszeitpunkt und mit fehlerhaftem Sprungintervall (eine Stunde zu zeitig).

Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die recht große Toleranzspanne einen derartigen Modellierungs- und Eingabefehler nicht erkennen lässt, und lediglich ein *einem einzigen Prüfpunkt in Variante 2* zu einer unzulässigen Abweichung führt.

## 1.4 Interpretation und Auswertung von Stundenmittelwerten als Ausgaben

Die bilanzierten Werte (Energiedichten, welche durch Division durch Wärmekapazitäten als Temperaturen ausgedrückt werden) ändern sich diskret in Stundenintervallen, d.h. es gibt einen Zustand vor und nach dem Integrationsintervall. Beispielsweise ist ein Raum zum Zeitpunkt  $t=0$  bei 20°C temperiert, wird dann in der nächsten Stunde einer mittleren Heizleistung von 250 W ausgesetzt und hat danach zum Zeitpunkt  $t = 1h$  eine entsprechende höhere Energie und somit Temperatur, bspw. 21 °C. Bei dieser Betrachtung ist der zeitliche Verlauf der Änderung nicht von Belang, lediglich die Bilanzierung aller Wärmeströme. Letztere gehen in das Modell ebenfalls als Mittelwerte oder Integralwerte (d.h. diskrete Energiemengen) ein. Ein solches Modell ergibt sich beispielsweise bei Integration der Gleichung (1) in Abschnitt 4.2.1 der DIN EN ISO 13791:2012-08 über einen Stundenzeitschritt (siehe Anhang A dieser Norm). Dabei werden diskrete Änderungen der Raumlufttemperatur von  $\theta_{a,i,t} = \theta_{a,i}(t)$  bis  $\theta_{a,i,t+\Delta t} = \theta_{a,i}(t + \Delta t)$  beschrieben. Die Temperaturen sind jeweils an den Zeitpunkten  $t_i = i \cdot \Delta t$  definiert, wobei üblicherweise  $\Delta t = 1h$  gesetzt wird.

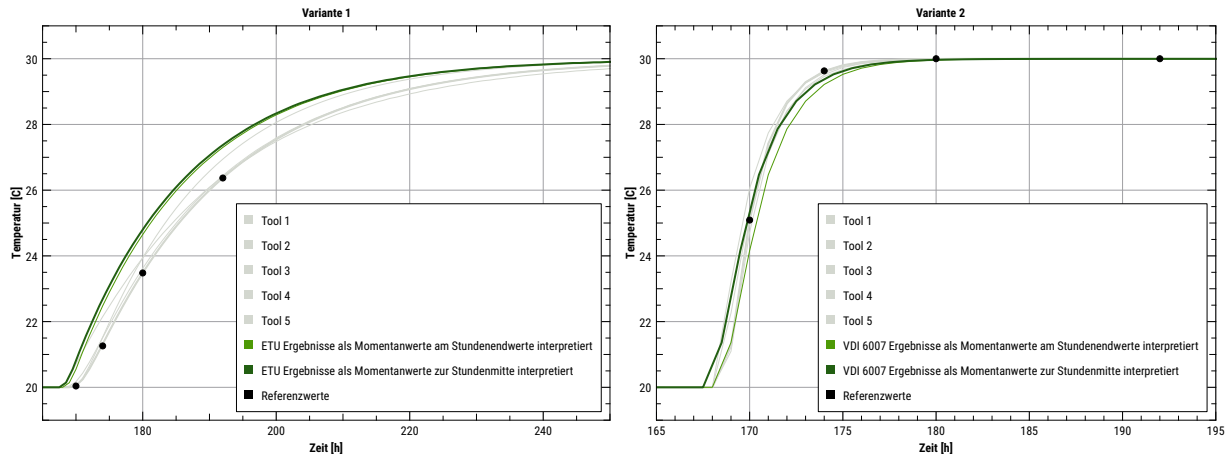
**Anmerkung:** Die in der Norm zitierte Lösung basiert auf einer Crank-Nicolson-Approximation der Zeitableitung, wie aus dem nachfolgend zitierten Normtext zu entnehmen ist.

„Für jeden Knoten nacheinander und hinsichtlich aller umgebenden Knoten, die sich in thermischem Kontakt befinden, wird die maßgebliche Differentialgleichung durch eine *implizite* numerische Näherung ersetzt, die auf der Tatsache beruht, dass die *halbe Summe der effektiven Wärmeströme zu Beginn und am Ende* eines beliebigen endlichen Zeitschrittes der Gesamtänderung der inneren Energie in dem Bereich gleichgesetzt wird, der durch den in Frage kommenden Knoten dargestellt wird.“ –DIN EN ISO 13791:2012-08, Abschnitt A3.1, b)

Die in jedem Zeitschritt berechneten *impliziten Ergebnisse* sind als Zustandswerte am *Ende des Zeitschritts* zu

interpretieren.

In der VDI 6007 wird das Berechnungsverfahren grundsätzlich unter Verwendung von Stundenmittelwerten formuliert. Damit sind sowohl Aktions- als auch Reaktionsgrößen (z.B. Raumlufttemperaturen) stets als Mittelwert der Stunde zu interpretieren, wobei in der VDI explizit eine Rekonstruktion eines Zeitverlaufs unterhalb von Stundenmittelwerten verworfen wird. Damit wäre nach VDI 6007 auch eine Linearisierung von zur Stundenmitte aufgetragenen Mittelwerten unzulässig. Dennoch ist diese Linearisierung sinnvoll und führt zu annehmbaren Ergebnissen, wie in Abbildung 1.2 gezeigt.



**Abbildung 1.2:** VDI Berechnungsergebnisse (Stundenmittelwerte) aufgetragen einmal als Momentanwerte am Stundenende und einmal zur Stundenmitte, Zwischenwerte sind linearisiert dargestellt.

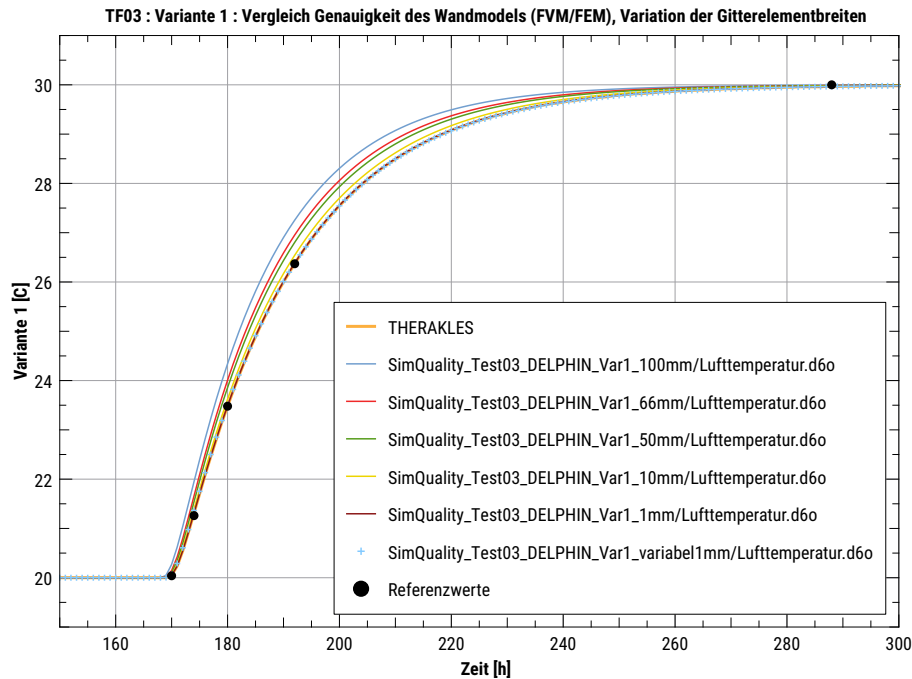
Ein VDI 6007 Berechnungsprogramm (Berechnungsverfahren nach VDI 6007, Blatt 1, Abschnitt 6) benötigt zunächst Stundenmittelwerte als Eingaben. Für die Aufgabenstellung in diesem Testfall ist daher der lineare Verlauf innerhalb einer Stunde von 20 auf 30 °C durch eine einheitliche Mitteltemperatur von 25 °C in zu ersetzen. Entsprechend der VDI Bezeichnung gilt diese Temperatur für Stunde #168 (von  $t=168\text{h}$  bis  $169\text{h}$ ). Die daraus resultierende erhöhte Raumtemperatur (Reaktionsgröße) wird vom VDI Berechnungsverfahren für die gleiche Stunde #168 ausgegeben, d.h. in der Ergebnisdatei steht für den Zeitpunkt 168h die erhöhte Temperatur. Im Sinne des Testfalls ist diese Temperatur jedoch zum Zeitpunkt  $t=168.5\text{h}$  zu interpretieren, welches zu der in Abb. 1.2 gezeigten Kurve (Stundenmitte) führt. Die andere Kurve im Diagramm (Stundenende) zeigt die Interpretation der Werte analog zur DIN bzw. zu klassischen Zeitintegrationsverfahren unter Verwendung von Stundenwerten, wobei der neue Zustand am Ende des Integrationsintervalls gilt.

Für die Auswertung der Prüfkriterien, d.h. Vergleich von Temperaturen mit Referenzwerten zu bestimmten Zeitpunkten, besteht eine Möglichkeit in der linearen Interpolation von Mittelwerten, wobei diese als Momentanwerte zur Stundenmitte interpretiert werden. Damit ergibt sich, bspw. der Wert zum Prüfzeitpunkt  $T(t=170\text{h}) = \frac{T(169.5) + T(170.5)}{2}$ . Für die nachfolgende Auswertung wird dieses Verfahren für die VDI Berechnungsprogramme verwendet.

## 1.5 Einfluss der Wandmodellgenauigkeit

Die Lösung der partiellen Differentialgleichung (PDG), welche die Wärmeleitung durch die Wandkonstruktion beschreibt, kann im Simulationsprogramm über verschiedene Approximationsansätze oder Ersatzmodelle erfolgen. Obwohl heutzutage klassische numerische Lösungsverfahren wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) oder Finite-Volumen-Methode (FVM) für die Lösung von partiellen Differentialgleichungen Stand der Technik sind, werden im Kontext der Gebäudenergiesimulation jedoch noch wie in der VDI vereinfachte Verfahren aus den 1980er Jahren verwendet. Diese Ersatzmodelle haben allerdings die Eigenschaft, dass selbst bei geeigneter Wahl der numerischen Parameter die exakte Lösung *nicht genau angenähert werden kann*. Lösungen basierend FEM oder FVM hingegen nähern sich bei zunehmender Verfeinerung des Gitters asymptotisch der exakten Lösung an und sind daher grundlegend geeignet, die formulierten physikalischen Gleichungen genau zu lösen.

Bei zeitgemäßen Integrationsverfahren mit raum aufgelöster Betrachtung der Wandbauteile (FEM/FVM) hat die Anzahl der Knoten bzw. Diskretisierungselemente in der Wandkonstruktion einen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Abb. 1.3 zeigt eine Variantenuntersuchung für die Prüfvariante 1 mit der 200 mm starken Materialschicht.



**Abbildung 1.3:** Gittersensitivitätsstudie bei Prüfvariante 1 unter Verwendung des Bauteilsimulationsprogramms DELPHIN; mit zunehmender Anzahl der Gitterelemente in der Wandkonstruktion nähern sich die Ergebnisse der exakten Lösung immer weiter an. Die mit + markierte Variante verwendet ein Berechnungsgitter mit variablen Breiten, wie auch in den Programmen THERAKLES und NANDRAD verwendet.

Die als Linien gezeigten Varianten verwenden jeweils gleich große Diskretisierungselemente, d.h. bei der 100mm-Variante sind dies 2, bei der 66mm-Variante 3, bei der 1mm-Variante 200, etc. Qualitativ ist klar zu erkennen, dass bei einer geringeren Anzahl von Elementen die Raumlufttemperatur schneller ansteigt, da die numerischen Approximationsfehler wie ein Erhöhung der Wärmeleitung wirken. In der DIN EN ISO 13791:2012-08 wird daher ausgeführt:

#### „A.3.2.2.1 Opake Bauteile

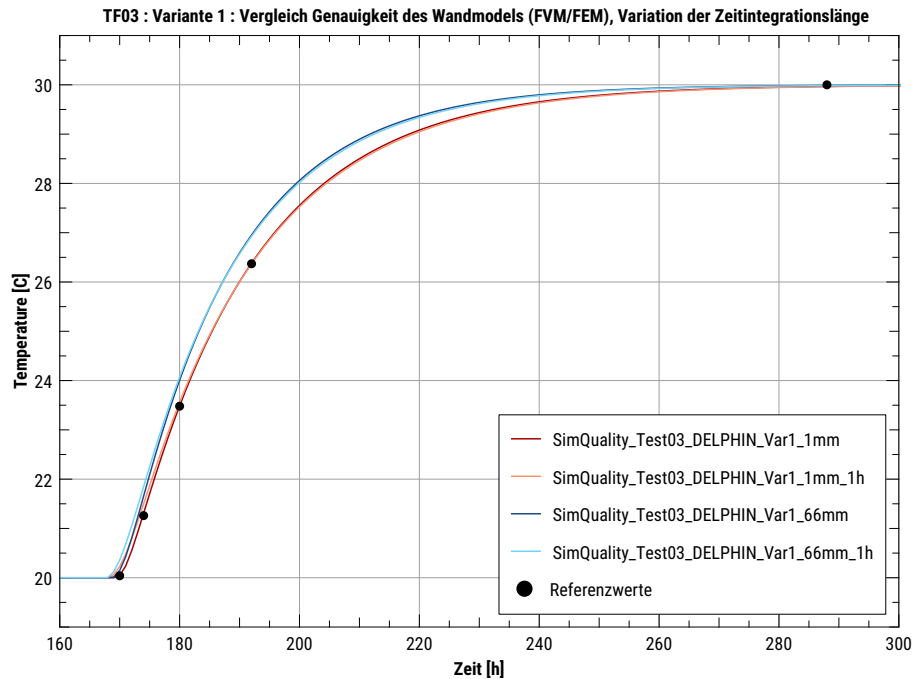
Im Hinblick auf die sich widersprechenden Anforderungen an eine hohe Genauigkeit einerseits und eine schnelle und kostengünstige Berechnung andererseits sollte die Unterteilung des Bauteils in verschiedene Knoten sorgfältig erwogen werden. *Drei Knoten je Element* (Schicht) (mit einem Knoten an jeder Elementbegrenzung und einem in der Mittelebene) sind *das Minimum* einer Knotendarstellung.“ –DIN EN ISO 13791:2012-08

Die im Diagramm rot gezeichnete Linie (66mm-Variante) stellt daher eine Toleranzgrenze dar, welche ggfs. als zusätzliches Prüfkriterium herangezogen werden könnte.

## 1.6 Einfluss der Zeitintegrationsschrittweite

Die in Abb. 1.3 gezeigten Berechnungsergebnisse wurden mit einem numerischen Integrator mit variablen (d.h. zum Teil sehr kleinen) Zeitschritten erstellt. In Simulationsprogrammen mit derartigen fehlerschätzerbasierten Zeitschrittwitenanpassungen<sup>1</sup>, werden die Zeitschritte so gewählt, dass die Fehler der Zeitdiskretisierung begrenzt werden. Ähnlich wie bei der räumlichen Gittergenerierung (siehe vorheriger Abschnitt) treten hier Abweichungen auf, welche mit zunehmender Zeitschrittlänge größer werden. Abb. 1.4 zeigt jedoch, dass der Einfluss bei der Prüfvariante 1 sehr gering ist, da nur sehr kleine zeitliche Gradienten auftreten. Damit ist also bei dieser Prüfvariante eine Integrationszeitschrittlänge von 1 h durchaus akzeptabel.

<sup>1</sup>Dieser Familie von Simulationsprogrammen gehören die Programme DELPHIN, THERAKLES und NANDRAD an.

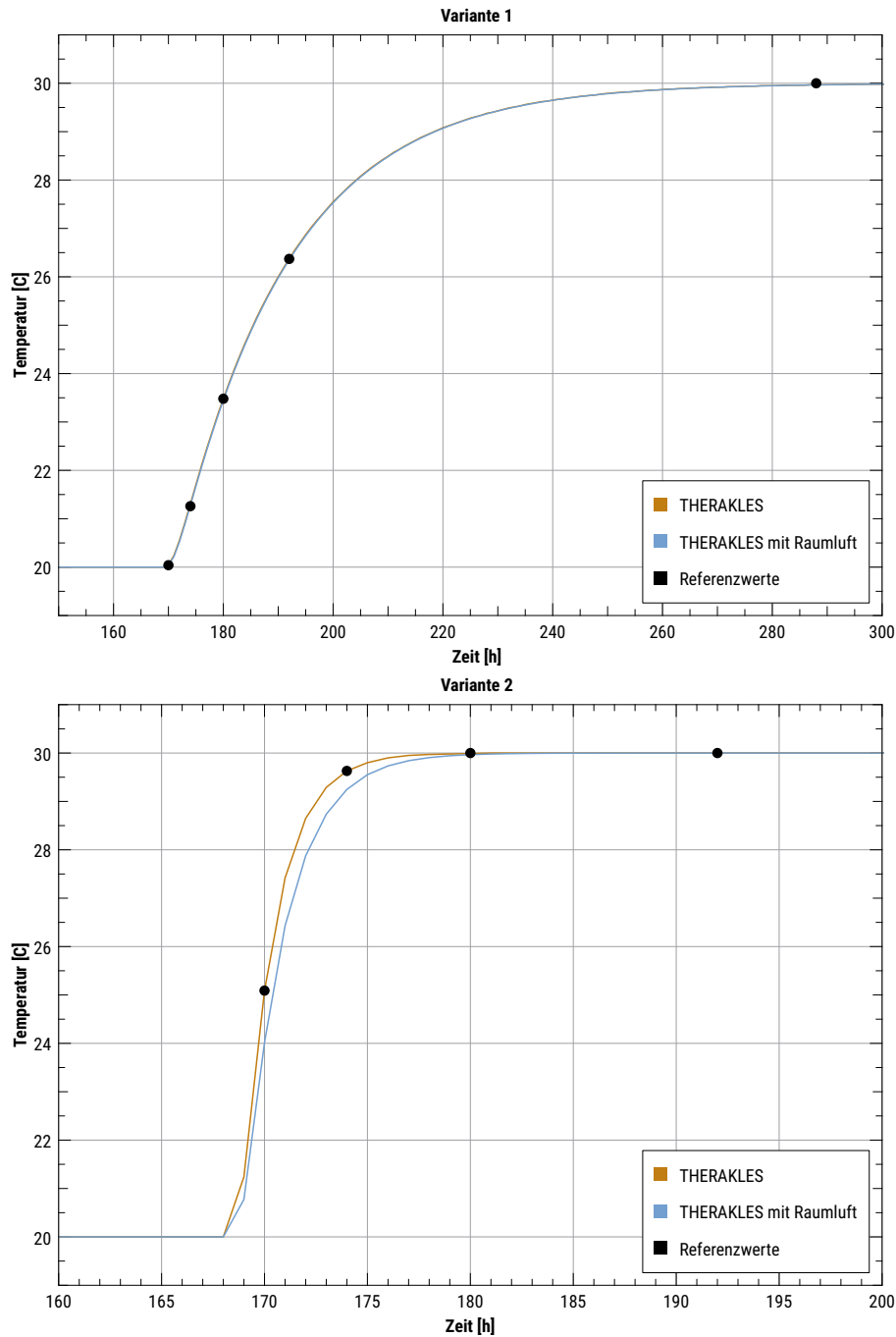


**Abbildung 1.4:** Zeitschrittlängenvariation bei Prüfvariante 1; die Gittervarianten 1mm (200 Elemente) und 66mm (3 Elemente) werden mit konstanten 1 min und 1 h Zeitschritten berechnet. Die Unterschiede sind nur in Bereichen größerer zeitlicher Änderungsraten (gleich zu Beginn der Temperaturänderung) relevant.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Ergebnisse wesentlich stärker von der Raumaufösung der Schichtenfolge bzw. Bauteile abhängt, als von der Zeitintegrationsschrittweite.

## 1.7 Einfluss der Berücksichtigung der Raumlufthärmekapazität

Laut Aufgabenstellung ist für den Vergleich mit der Referenzlösung keine Raumlufthärmekapazität zu definieren. Um bei Programmen, welche die Kapazität der Raumlufth nicht anpassen können, diese Fehlerquelle zu reduzieren, wurde die Raumgeometrie in der DIN Norm sehr klein gewählt ( $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ ). Tatsächlich ist die Kapazität der Raumlufth nur bei der leichten Konstruktionsvariante 2 von Bedeutung, wie Abbildung 1.5 zeigt. Die berechneten Raumlufthtemperaturen ändern sich in Varianten 1 nur minimal, in Variante 2 jedoch deutlich. Daher ist zumindest für Variante 2 die Raumlufthkapazität auf Null zu setzen, oder soweit es das Programm erlaubt, zu minimieren.



**Abbildung 1.5:** Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 1 und 2 mit dem Programm THERAKLES, jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Wärmekapazität des 30 m<sup>3</sup> Raumluftvolumens.

**Anmerkung:** Da es jedoch auch Programme gibt, die eine Mindestkapazität der Raumluft verlangen. Dabei treten dann vor allem bei kleinen Raumvolumina Fehler auf. In diesem Prüffall wurde daher eine realistischere Raumgeometrie 2x5x3m<sup>3</sup> gewählt. Aufgrund der größeren Wandflächen und entsprechend höheren Wärmekapazitäten im Vergleich zur Raumluft, werden Fehler aus Berücksichtigung der Wärmekapazität der Raumluft kleiner.

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Zeitliche Verläufe

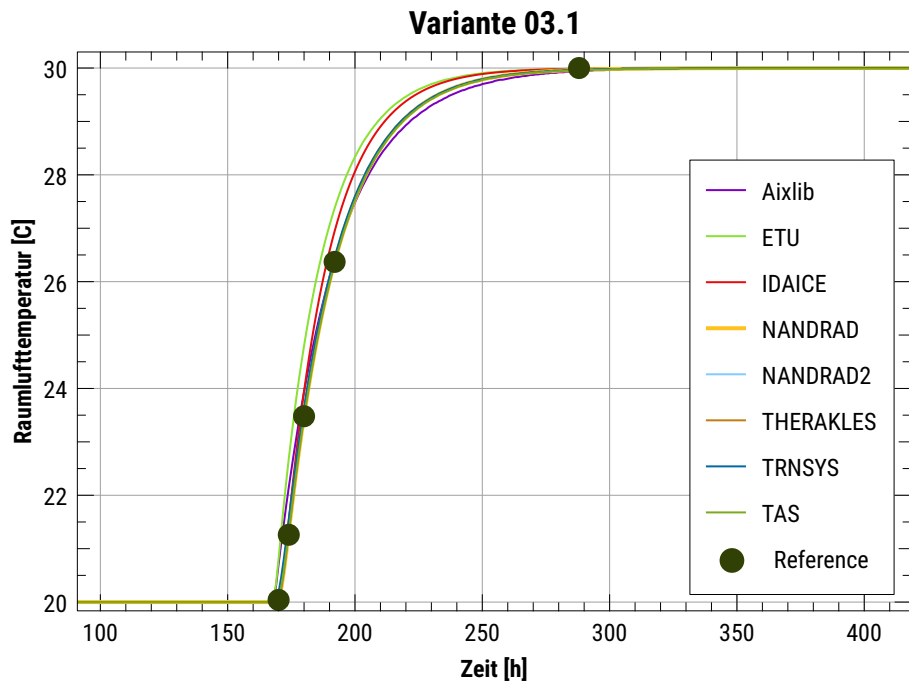


Abbildung 2.1: Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 1

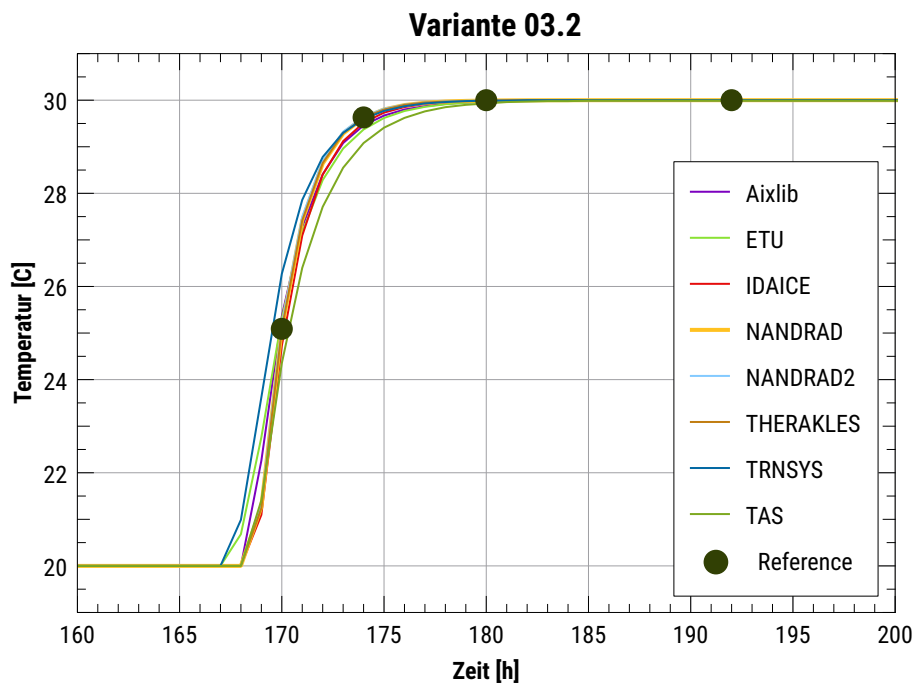


Abbildung 2.2: Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 2



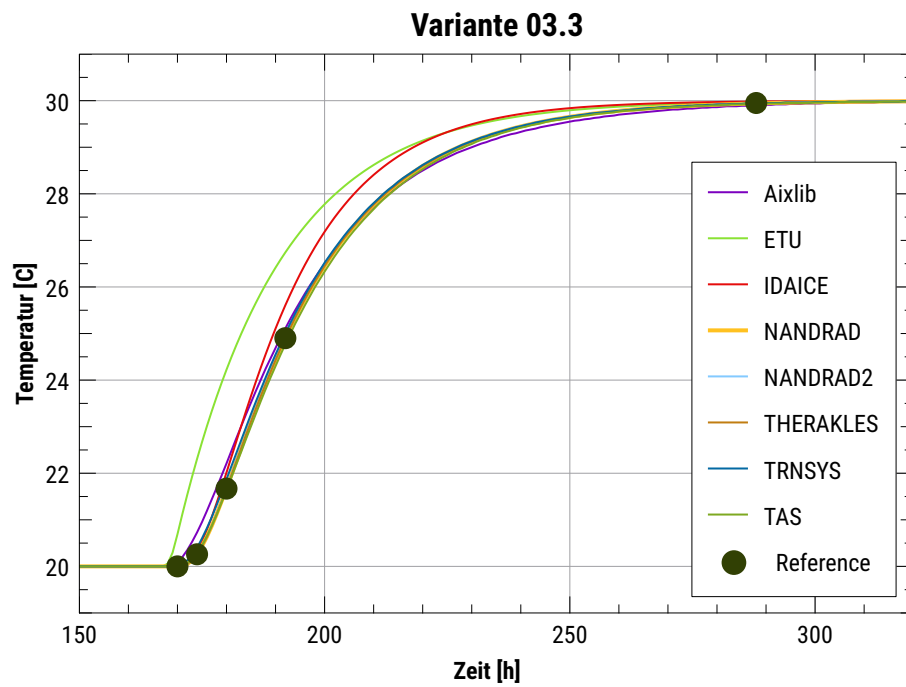


Abbildung 2.3: Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 3

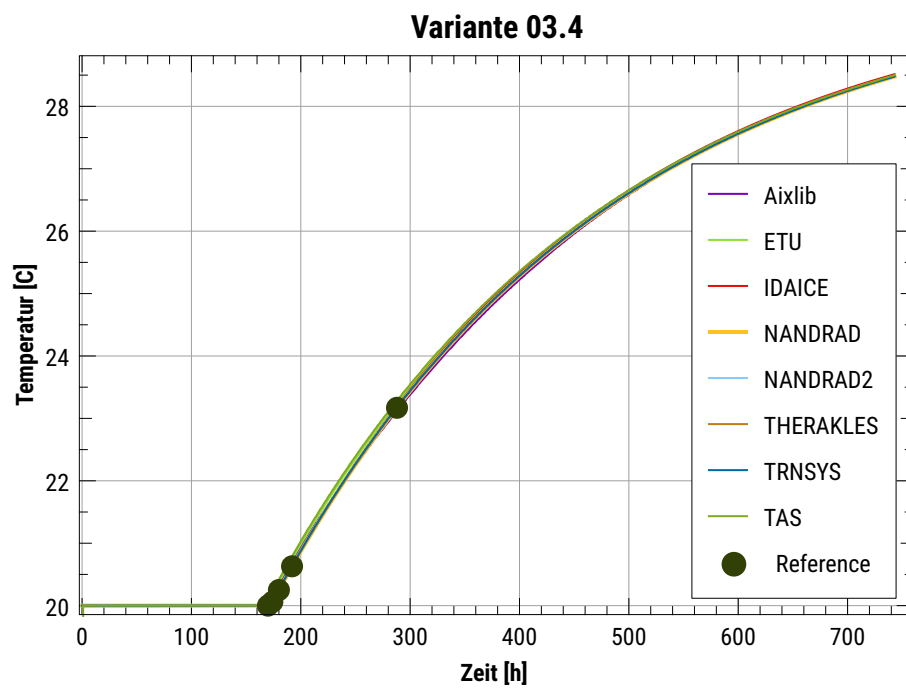


Abbildung 2.4: Simulierte Lufttemperaturen bei Prüfvariante 4

## 2.2 Vergleich mit Referenzwerten

**Tabelle 2.1:** Simulationsergebnisse und Referenzwerte an geforderten Prüfzeitpunkten und Validierungsergebnisse

		Temperaturen [°C]					Abweichungen [K]					Nachweis
		2 h	6 h	12 h	24 h	120 h	2 h	6 h	12 h	24 h	120 h	
Nr. 1	Norm	20.04	21.26	23.48	26.37	30.00	---	---	---	---	---	
	Aixlib	20.71	22.15	23.94	26.41	29.94	0.67	0.89	0.46	0.04	0.06	---
	ETU	20.81	22.69	24.80	27.37	29.99	0.77	1.43	1.32	1.00	0.01	---
	IDAICE	20.06	21.53	23.95	26.94	29.99	0.02	0.27	0.47	0.57	0.01	---
	NANDRAD	20.05	21.32	23.48	26.37	29.97	0.01	0.06	0.00	0.00	0.03	erfüllt
	TAS	20.07	21.07	22.92	25.60	29.89	0.03	0.19	0.56	0.77	0.11	---
	THERAKLES	20.05	21.31	23.48	26.37	29.97	0.01	0.05	0.00	0.00	0.03	erfüllt
	TRNSYS	20.12	21.36	23.49	26.37	29.97	0.08	0.10	0.01	0.01	0.03	erfüllt
Nr. 2	Norm	25.09	29.63	30.00	30.00	30.00	---	---	---	---	---	
	Aixlib	25.36	29.46	29.97	30.00	30.00	0.27	0.17	0.03	0.00	0.00	erfüllt
	ETU	25.32	29.37	29.97	30.00	30.00	0.23	0.26	0.03	0.00	0.00	erfüllt
	IDAICE	24.73	29.52	29.99	30.00	30.00	0.37	0.11	0.01	0.00	0.00	erfüllt
	NANDRAD	25.09	29.62	29.99	30.00	30.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	erfüllt
	TAS	24.31	29.05	29.93	29.99	29.99	0.78	0.58	0.07	0.01	0.01	---
	THERAKLES	25.09	29.63	29.99	30.00	30.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	erfüllt
	TRNSYS	24.95	29.45	29.99	30.00	30.00	0.15	0.18	0.02	0.00	0.00	erfüllt
Nr. 3	Norm	20.00	20.26	21.67	24.90	29.95	---	---	---	---	---	
	Aixlib	20.09	20.73	22.21	25.11	29.90	0.09	0.47	0.54	0.21	0.05	---
	ETU	20.69	22.31	24.22	26.74	29.96	0.69	2.05	2.55	1.84	0.01	---
	IDAICE	20.00	20.32	22.02	25.61	29.98	0.00	0.06	0.35	0.71	0.03	---
	NANDRAD	20.00	20.26	21.68	24.90	29.94	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	erfüllt
	TAS	20.00	20.23	21.38	24.17	29.84	0.00	0.03	0.29	0.73	0.11	---
	THERAKLES	20.00	20.26	21.67	24.90	29.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	erfüllt
	TRNSYS	20.01	20.32	21.73	24.89	29.94	0.01	0.06	0.06	0.01	0.01	erfüllt
Nr. 4	Norm	20.00	20.06	20.25	20.63	23.17	---	---	---	---	---	
	Aixlib	20.02	20.14	20.33	20.70	23.12	0.02	0.08	0.08	0.07	0.05	erfüllt
	ETU	20.05	20.18	20.37	20.74	23.25	0.05	0.12	0.12	0.11	0.08	erfüllt
	IDAICE	19.99	20.06	20.25	20.63	23.20	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	erfüllt
	NANDRAD	20.00	20.06	20.25	20.62	23.17	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	erfüllt
	TAS	20.18	20.24	20.42	20.78	23.25	0.18	0.18	0.17	0.15	0.08	erfüllt
	THERAKLES	20.00	20.06	20.25	20.62	23.17	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	erfüllt
	TRNSYS	20.00	20.07	20.25	20.63	23.17	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	erfüllt

## 2.3 Programmspezifische Anmerkungen

Bei den Programmen ETU und TRNSYS wurden die Ergebnisse als Mittelwerte der Stundenschritte interpretiert und dazwischen die Temperaturverläufe linear interpoliert (entsprechend der Darstellung im Diagramm).

Bei TRNSYS wurde eine Vergleichsberechnung zwischen 15min und 1h-Schrittweiten durchgeführt, wobei die Unterschiede höchsten 0,1 K betrugen. Für die Auswertung wurde die Variante mit Stundenschritten verwendet.

Beim Programm TAS wurde zunächst die Variante mit der Raum-in-Raum Modellbildung geprüft, um die Anforderungen an die außenseitigen Wärmeübergangskoeffizienten zu erfüllen. Mit Ausblick auf die nachfolgenden Tests wurde dann der Raum noch einmal als Raum mit normalen Außenwänden und TAS-spezifisch berechneten Übergangskoeffizienten gerechnet. Diese Ergebnisse sind für die Prüfung verwendet worden.

## 3 Bewertung der Tools

Alle der getesteten Programme erfüllen weitestgehend die Anforderungen des Prüffalls. Größere Abweichungen gibt es bei den Prüffällen 1 und 3, in denen vor allem ETU Simulation signifikante Abweichungen von  $> 2 K$  aufweist. Die Programme THERAKLES und NANDRAD stimmen wegen der detaillierten Wandmodellierung (Finite-Volumen-Modelle) fast exakt mit der Referenzlösung überein. Genauso TRNSYS, welches mit den Referenzlösungen exakt übereinstimmt.