

SimQuality - Validierung der Wärmegewinne/-verluste durch Lüftung

IBK, TU Dresden

27. April 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	Tools, Berechnungsvarianten und Bemerkungen	2
1.1	Tools	2
1.2	Bemerkungen und Probleme	2
2	Ergebnisse	4
2.1	Zeitliche Verläufe	4
2.1.1	Variante 01 - kein Luftwechsel	4
2.1.2	Variante 02 - konstante Luftwechselrate	5
2.1.3	Variante 03 - variable Luftwechselrate	6
2.1.4	Variante 04 - geregelte Luftwechselrate	7
3	Auswertung	7
4	Bewertung	7
4.1	Monatsbilanzen	8
4.2	absolute Abweichungskriterien	10
4.3	statistische Abweichungskriterien	11
4.4	Gesamtbewertung	13

1 Tools, Berechnungsvarianten und Bemerkungen

1.1 Tools

Die in 1.1 aufgelisteten Programme haben an dem Testfall teilgenommen.

Tabelle 1.1: Übersicht über die Programme, die an dem Testfall „Lüftung“ teilgenommen haben

Programm	Version	Bearbeiter
NANDRAD	1.8	Stephan Hirth, IBK TU Dresden
Therakles	3.3.1	Andreas Nicolai, IBK TU Dresden
IDA ICE	4.8.0.1	Caroline Seifert, INNIUS DÖ
TRNSYS	18	Julian Agudelo, Hochschule München
ETU / Hottgenroth	4.1	Dr. Rainer Rolfs, ETU Hottgenroth
Modelica	Dymola Version 4.1	Amin Nouri, RWTH Aachen
	AixLib Version 0.7.3	
TAS	-	-

1.2 Bemerkungen und Probleme

Bei der Erstellung des Testfalles gibt es gewisse Randbedingungen/Modifikationen, die bei der Erstellung betrachtet werden müssen. Einige Programme, wie IDA ICE und TAS, können die Feuchteberechnung nicht deaktivieren und bilanzieren latente Wärmeströme stets mit. Um dies zu umgehen muss in der Wetterdatei eine Luftfeuchtigkeit nahe null (z.B. 1%) gesetzt werden und die relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft ebenfalls nahe null zum Startzeitpunkt gesetzt werden oder anfänglich eine hohe Luftwechselrate angesetzt werden. Um die Startbedingungen anzugleichen, werden in den ersten 20 Tagen des Jahres konstante klimatische Randbedingungen gesetzt und der Vergleich der Programme anschließend ab Februar durchgeführt. Weiterhin wird die Dichte und Wärmekapazität der Luft festgesetzt, da über die Wärmekapazität und die Luftwechselrate die Wärmeströme direkt zusammenhängen über $Q_{Lüftung} = n \cdot V_{Raum} \cdot \rho \cdot c_p$. Differenzen bei diesen Randbedingungen würden jedoch nur kleine Abweichungen erzeugen, sollen aber der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Zusammenfassend können folgende Probleme genannt werden:

1. Festsetzung der Luftfeuchtigkeit nahe null (z.B. 1%)
2. Festsetzung der Luftdichte und Wärmekapazität
3. korrekte Abbildung des erhöhten Nachtluftwechsels mittels eines Zeitplanes

Weiterhin besteht die Problematik des Vergleiches von Momentanwerten zum Stundenende und Stundenmittelwerten bei Wärmeströmen. Dazu wurde in THERAKLES Variante 03, in der sich stark ändernde Luftwechselraten geprüft werden, einerseits Momentanwerten zum Stundenende (THERAKLES) und Stundenmittelwerte (THERAKLES MEAN) als Simulationsausgabe betrachtet. Dabei wird ersichtlich, dass der qualitative Verlauf sehr ähnlich aber um eine halbe Stunde nach vorn versetzt ist, was durch die Mittlung bedingt ist. Jedoch bei der Erstellung der Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme bei stark schwankenden Luftwechselraten und Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft durch das Rechteck-Integral starke Abweichungen in den Monatsbilanzen auftreten können (siehe 1.1 und 1.2). Dies passiert vor allem im August.

Das bedeutet, dass die Validierung mittel der Monatsbilanzen kritisch zu sehen ist, und man zwingend Stundenmittelwerte verwenden sollte. Die Aufgabenstellung wird dahingehend angepasst.

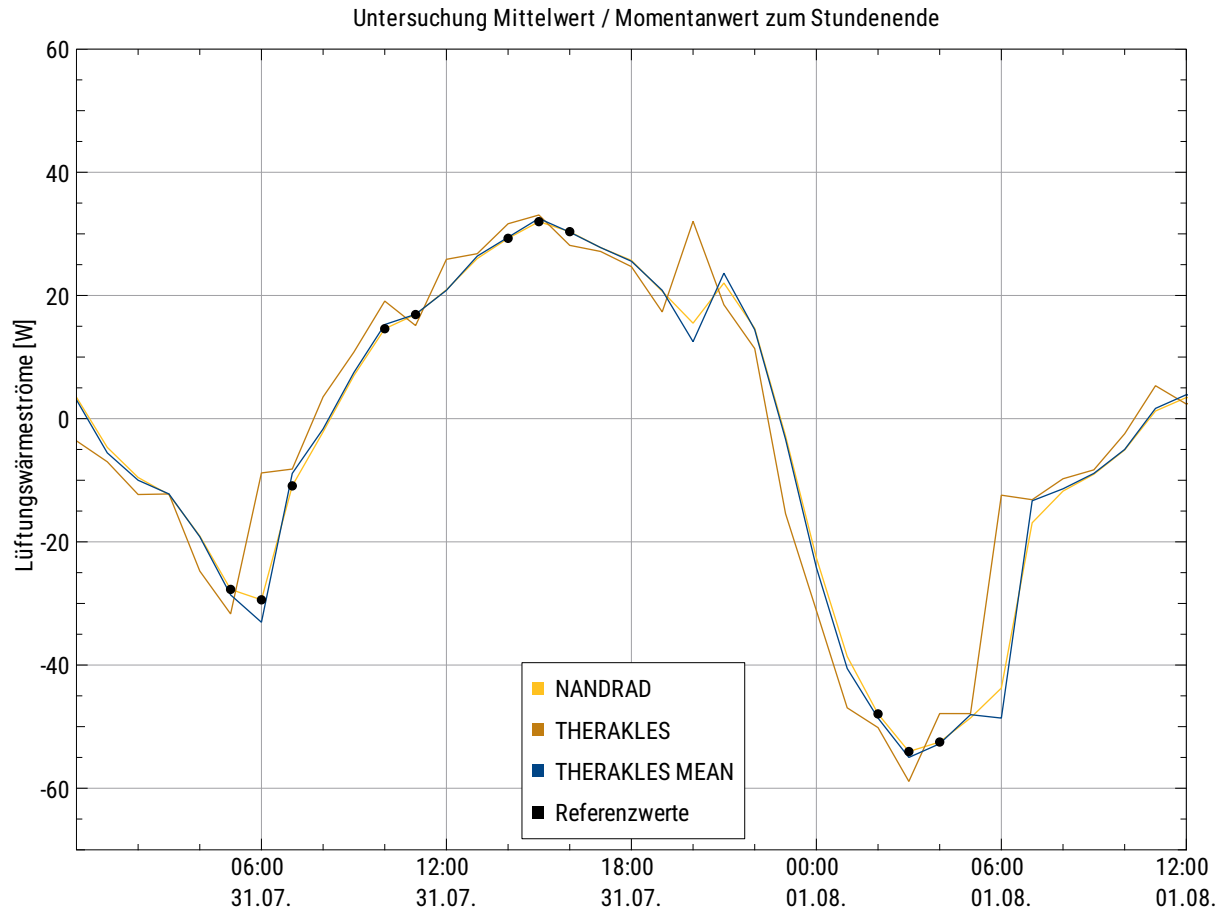
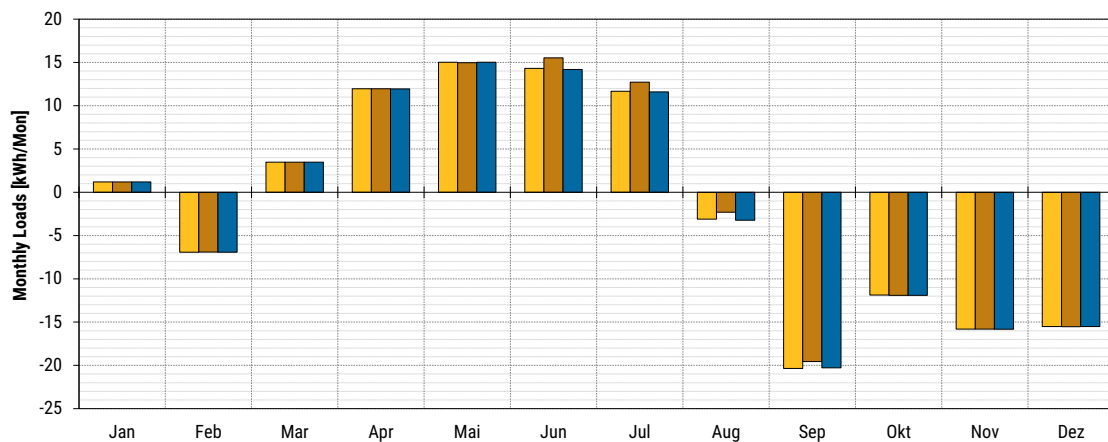


Tabelle 1.2: Vergleich des Monatsbilanzen für Variante 03 - Differenz zwischen Momentanwert zum Stundenende und Stundenmittelwert

Variante 03	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
NANDRAD	1.18	-6.93	3.48	11.96	15.02	14.31	11.66	-3.10	-20.35	-11.88	-15.80	-15.52
THERAKLES	1.18	-6.92	3.48	11.96	14.97	15.53	12.71	-2.30	-19.56	-11.91	-15.81	-15.53
THERAKLES_MEAN	1.18	-6.93	3.47	11.95	15.01	14.18	11.60	-3.23	-20.29	-11.91	-15.82	-15.53

Differenz	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
THERAKLES	-	0%	0%	0%	0%	9%	9%	-26%	-4%	0%	0%	0%
THERAKLES_MEAN	-	0%	0%	0%	0%	-1%	-1%	4%	0%	0%	0%	0%



2 Ergebnisse

Um die vom jeweiligen Programm errechneten Energiebilanzen zu überprüfen, werden mehrere Kriterien geprüft.

2.1 Zeitliche Verläufe

2.1.1 Variante 01 - kein Luftwechsel

Zeitverläufe der Raumlufttemperaturen & Lüftungswärmeströme über das ganze Jahr

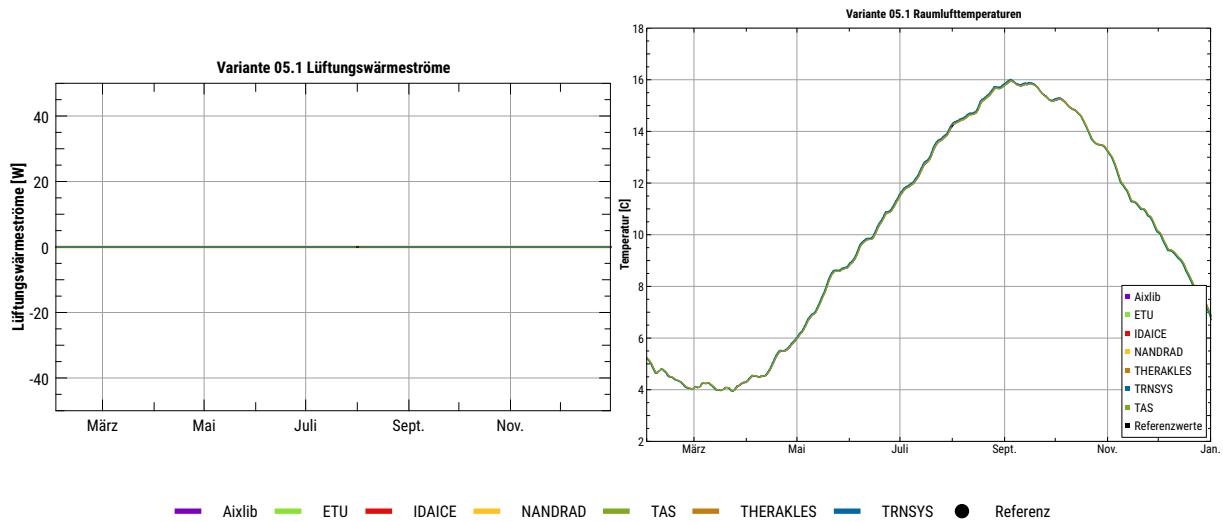


Abbildung 2.1: Raumlufttemperatur für Variante 05.1

Zeitverläufe der Lüftungswärmeströme & Lüftungswärmeströme in der sommerliche Testwoche

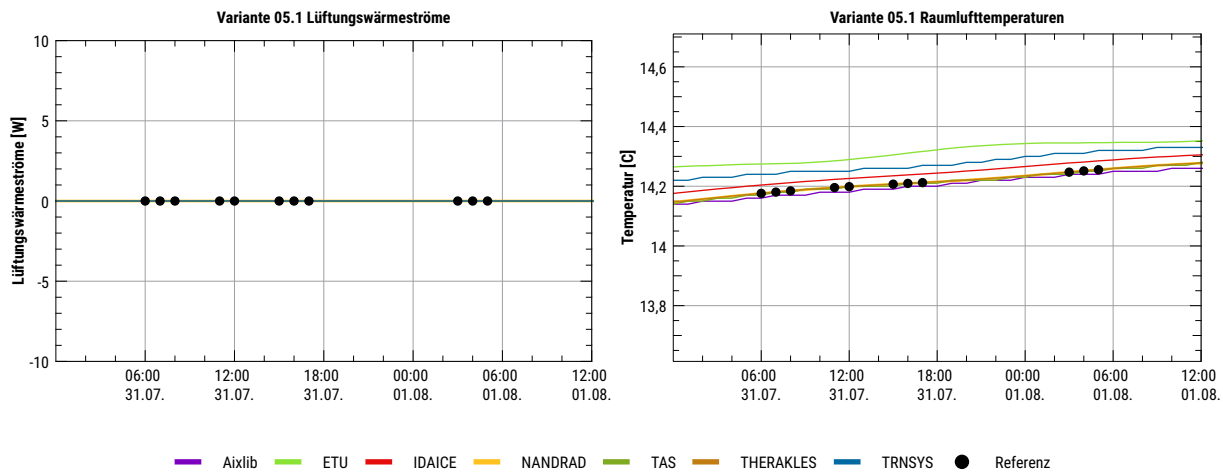


Abbildung 2.2: Lüftungswärmestrom für Variante 05.1

2.1.2 Variante 02 - konstante Luftwechselrate

Zeitverläufe der Raumlufthtemperaturen

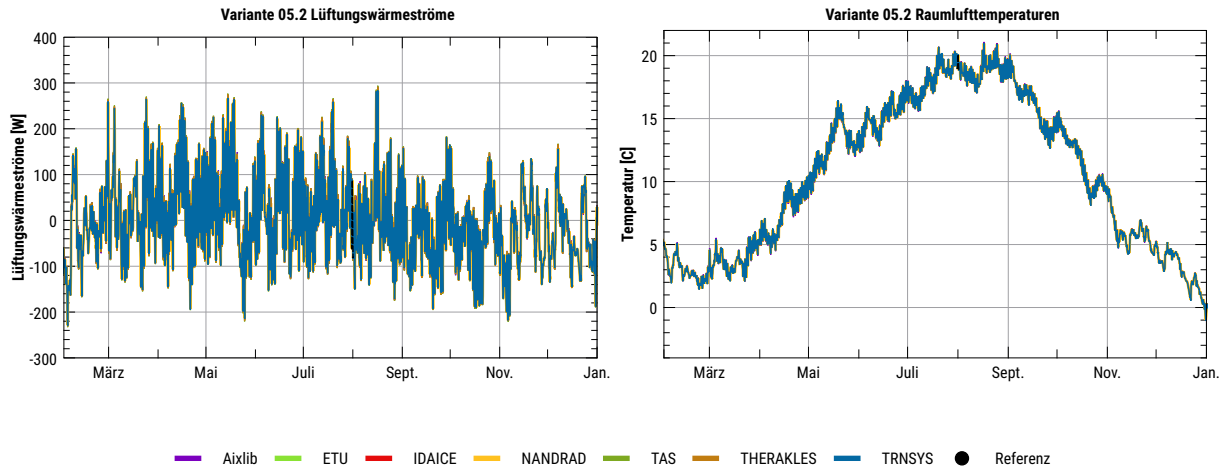


Abbildung 2.3: Raumlufthtemperature für Variante 05.2

Lüftungswärmeströme & Lüftungswärmeströme in der sommerliche Testwoche

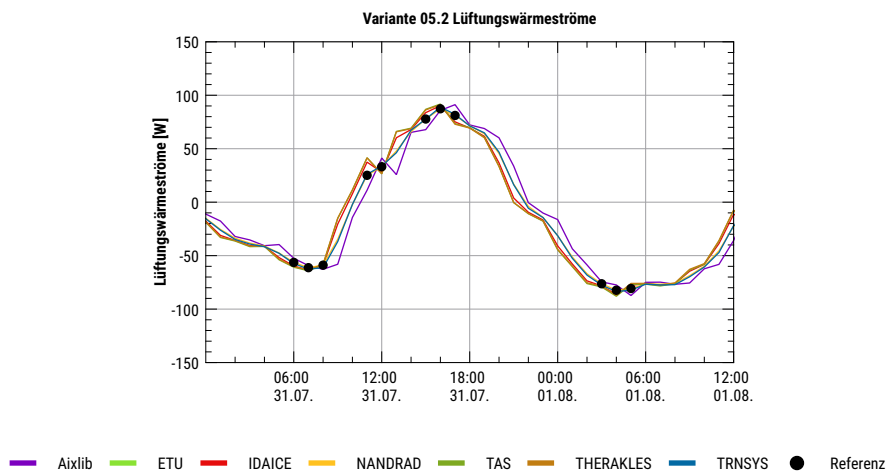


Abbildung 2.4: Lüftungswärmestrom für Variante 05.2

2.1.3 Variante 03 - variable Luftwechselrate

Zeitverläufe der Raumlufttemperaturen & Lüftungswärmeströme über das ganze Jahr

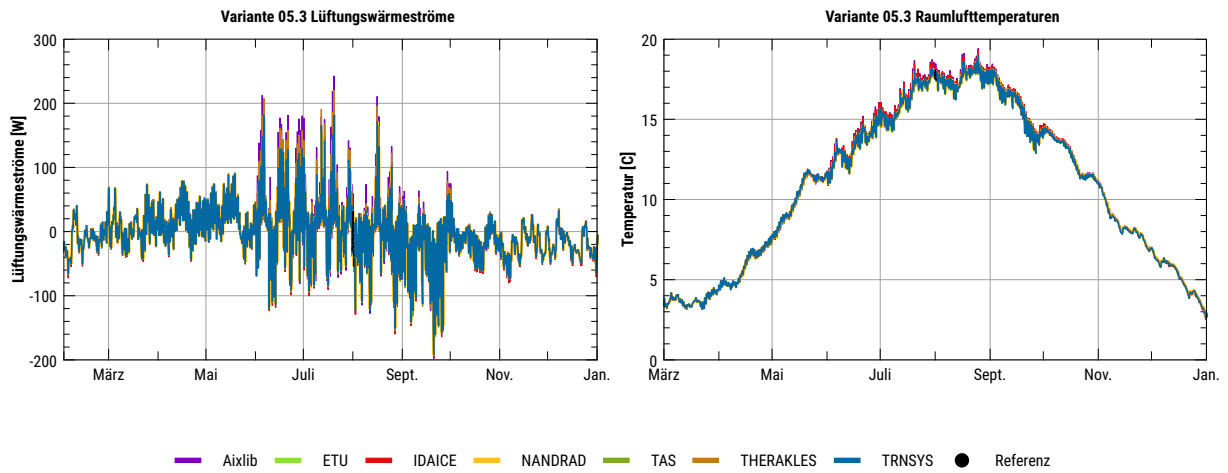


Abbildung 2.5: Raumlufttemperatur für Variante 05.3

Zeitverläufe der Lüftungswärmeströme & Lüftungswärmeströme in der sommerliche Testwoche

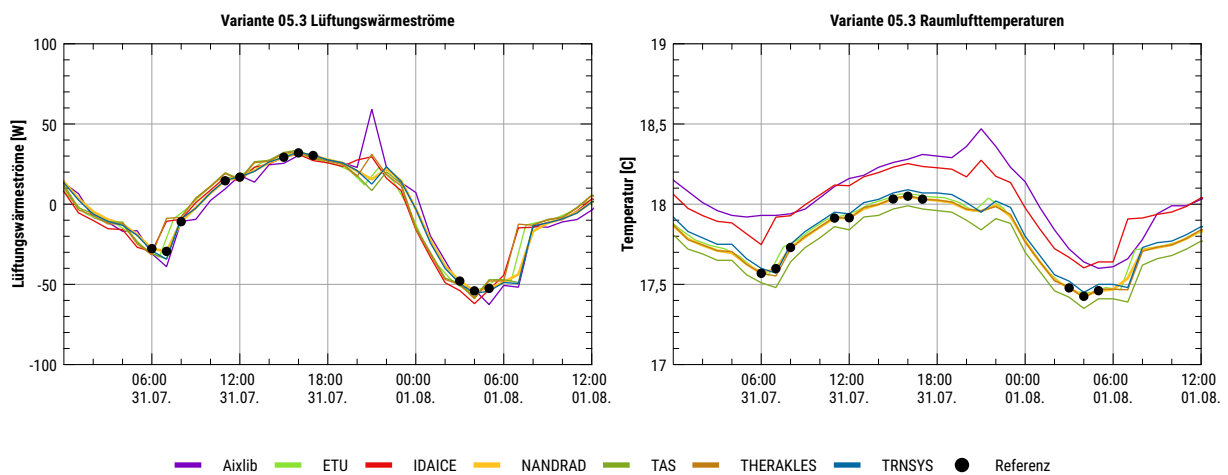


Abbildung 2.6: Lüftungswärmestrom für Variante 05.3

2.1.4 Variante 04 - geregelte Luftwechselrate

Zeitverläufe der Raumlufttemperaturen & Lüftungswärmeströme über das ganze Jahr

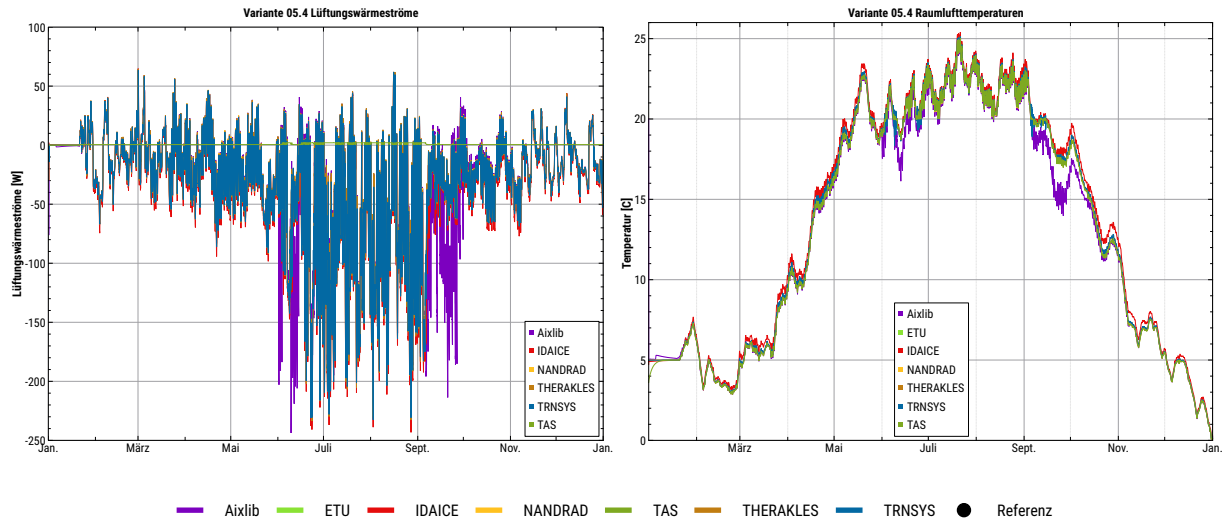


Abbildung 2.7: Raumlufttemperatur für Variante 05.4

Zeitverläufe der Lüftungswärmeströme & Lüftungswärmeströme in der sommerliche Testwoche

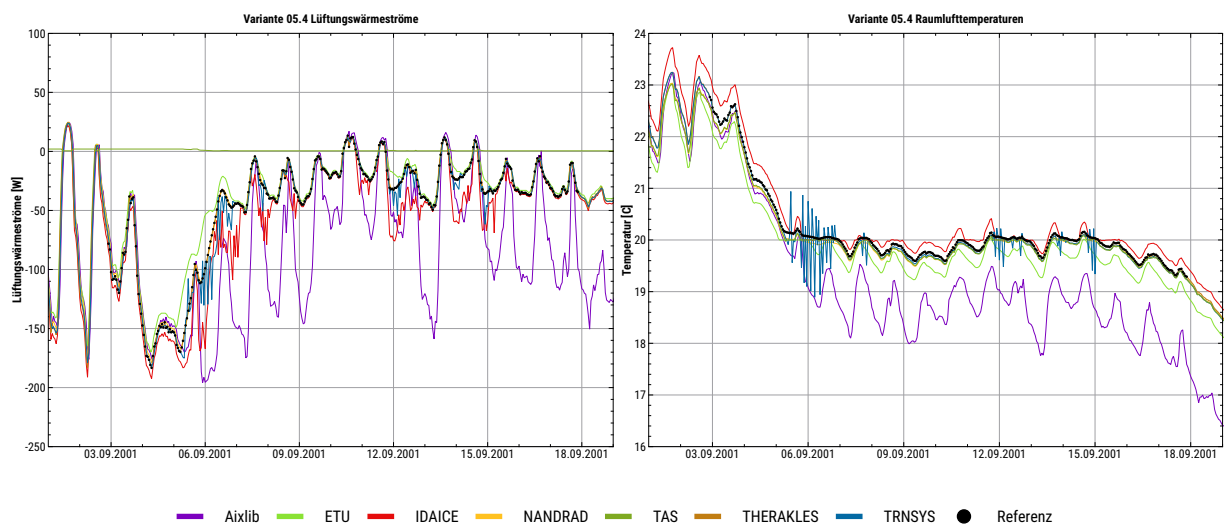


Abbildung 2.8: Lüftungswärmestrom für Variante 05.4

3 Auswertung

Bezüglich der Ergebnisse sind einige Differenzen festzustellen. Dies liegt einerseits an unterschiedlichen Randbedingungen in den Lüftungsmodellen (z.B. Dichte / Wärmekapazität, anderes Steuerungsverhalten) aber auch an unterschiedlichen Wand-Ersatzmodellen, die aber durch die inneren Last keinen so hohen Einfluss aufweisen sollte.

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 IDA ICE zeigen in diesem Testfall einige Abweichungen, die unter Abschnitt 4 weiter diskutiert werden. Zur weiteren Bewertung der einzelnen Programme dient die Raumlufttemperatur am Stundenende sowie die Lüftungswärmeströme.

4 Bewertung

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

1. Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme für das ganze Jahr ab dem Monat Februar
2. Absolute Abweichungen der Raumlufttemperaturen in der Sommerwoche (13. August bis 20. August) mit höchsten Außenlufttemperaturen
3. Statistische Abweichungen der Raumlufttemperaturen an den Tagen 31. Juli bis 02. August

Als Referenz wird derzeit NANDRAD / TRNSYS verwendet, da beide Programme bei den vorhergehenden Testfällen die genauesten Ergebnisse geliefert haben und damit auch in diesem Testfall also hinreichend genau gelten können.

4.1 Monatsbilanzen

Einerseits werden die Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme verglichen. Dazu müssen zwingend Stundenmittelwerte verglichen werden, da bei zu starken Schwingungen Momentanwerte über das Rechteck-Integral im August zu größeren Abweichungen führen kann insbesondere bei Variante 03, bei dem die Luftwechselrate stark schwankt (1.1). Die Monatsbilanzen sollten von der Referenz nicht mehr als 10 abweichen.

Diese sind in Tab. 4.1 und in Abb. 4.1 dargestellt.

Abbildung 4.1: Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme der Variante 02

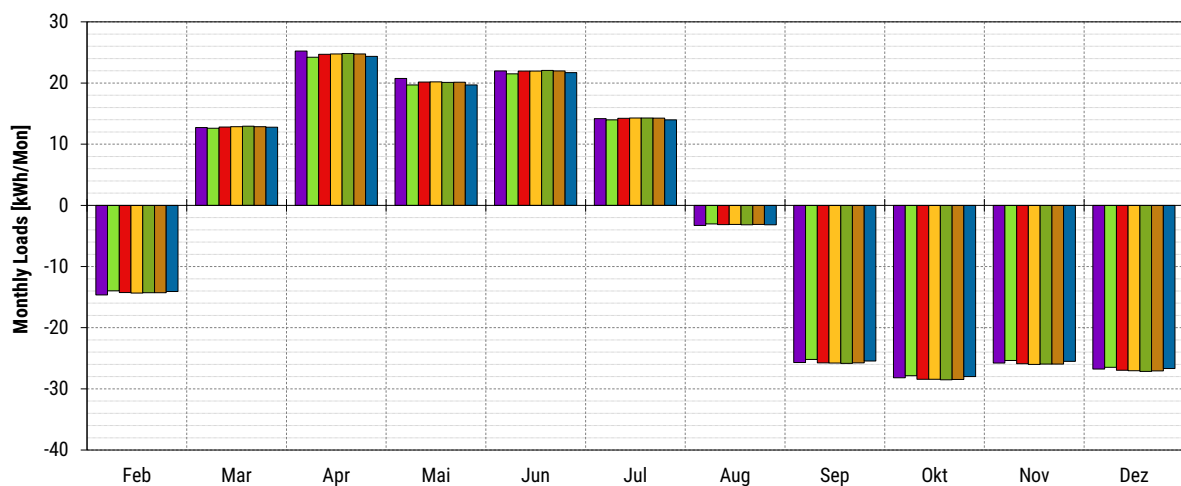


Tabelle 4.1: Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme der Variante 02

Variante 02	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Aixlib	2.83	-14.63	12.73	25.21	20.74	21.99	14.19	-3.27	-25.70	-28.18	-25.78	-26.76
ETU	2.65	-13.97	12.60	24.22	19.69	21.52	13.97	-3.04	-25.19	-27.86	-25.36	-26.49
IDAICE	2.76	-14.25	12.80	24.68	20.17	21.94	14.24	-3.14	-25.75	-28.42	-25.88	-26.96
NANDRAD	2.78	-14.34	12.87	24.74	20.19	21.95	14.28	-3.12	-25.77	-28.43	-25.99	-27.05
TAS	35.16	-14.29	12.95	24.82	20.12	22.07	14.27	-3.16	-25.84	-28.53	-25.96	-27.14
THERAKLES	2.78	-14.28	12.86	24.75	20.14	21.97	14.26	-3.11	-25.75	-28.48	-25.94	-27.06
THERAKLES_MEAN	2.78	-14.34	12.85	24.70	20.17	21.94	14.26	-3.14	-25.78	-28.47	-25.98	-27.06
TRNSYS	2.74	-14.09	12.77	24.37	19.69	21.70	13.98	-3.18	-25.44	-27.99	-25.51	-26.68

Differenz	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	
Aixlib	-	2%	-1%	2%	3%	0%	-1%	6%	0%	-1%	-1%	-1%	erfüllt
ETU	-	-3%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	0% erfüllt
IDAICE	-	-1%	-1%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0% erfüllt
NANDRAD	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0% erfüllt
TAS	-	0%	1%	0%	0%	1%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0% erfüllt
THERAKLES	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0% erfüllt
THERAKLES_MEAN	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0% erfüllt
TRNSYS	-	-2%	-1%	-2%	-2%	-1%	-2%	3%	-1%	-2%	-2%	-1%	erfüllt

Abbildung 4.2: Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme der Variante 03

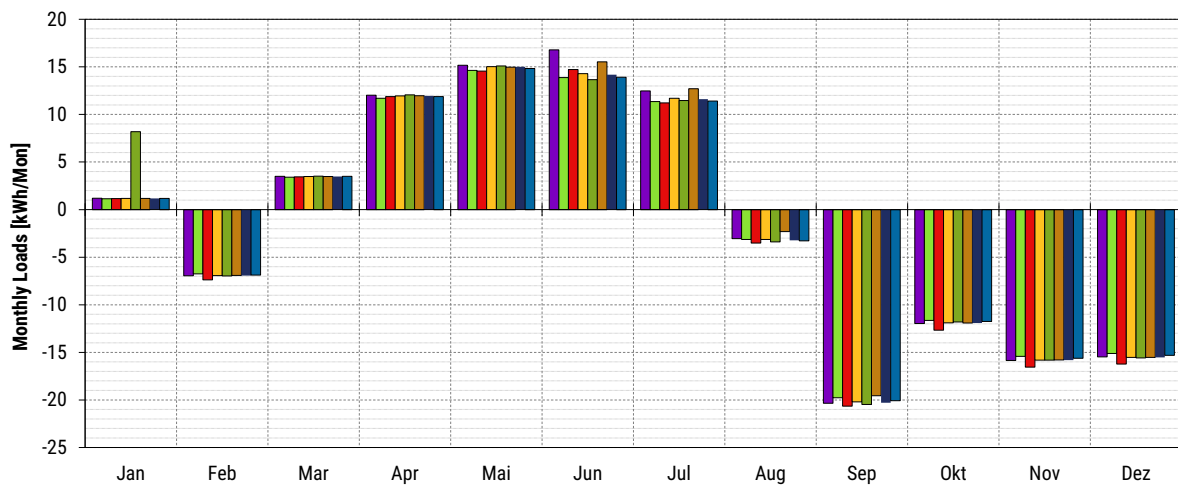


Tabelle 4.2: Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme der Variante 03

Variante 03	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Aixlib	1.19	-6.96	3.50	12.01	15.17	16.80	12.48	-3.05	-20.35	-11.98	-15.86	-15.47
ETU	1.15	-6.75	3.40	11.69	14.64	13.88	11.36	-3.13	-19.77	-11.64	-15.43	-15.12
IDAICE	1.16	-7.39	3.45	11.87	14.55	14.71	11.21	-3.52	-20.65	-12.67	-16.55	-16.23
NANDRAD	1.18	-6.93	3.48	11.96	15.02	14.29	11.70	-3.14	-20.21	-11.90	-15.82	-15.52
TAS	8.18	-6.97	3.52	12.06	15.09	13.66	11.47	-3.40	-20.47	-11.81	-15.82	-15.58
THERAKLES	1.18	-6.92	3.48	11.96	14.97	15.53	12.71	-2.30	-19.56	-11.91	-15.81	-15.53
THERAKLES_MEAN	1.18	-6.93	3.47	11.95	15.01	14.18	11.60	-3.23	-20.29	-11.91	-15.82	-15.53
TRNSYS	1.18	-6.88	3.50	11.88	14.83	13.91	11.41	-3.29	-20.08	-11.75	-15.61	-15.31

Differenz	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Aixlib	-	0%	1%	0%	1%	17%	7%	-2%	0%	1%	0%	0% ---
ETU	-	-3%	-2%	-2%	-3%	-3%	-3%	1%	-3%	-2%	-2%	0% erfüllt
IDAICE	-	7%	-1%	-1%	-3%	3%	-4%	13%	1%	7%	5%	5% ---
NANDRAD	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	-1%	0%	0%	0% erfüllt
TAS	-	1%	1%	1%	1%	-5%	-2%	9%	1%	-1%	0%	0% erfüllt
THERAKLES	-	0%	0%	0%	0%	9%	9%	-26%	-4%	0%	0%	0% ---
THERAKLES_MEAN	-	0%	0%	0%	0%	-1%	-1%	4%	0%	0%	0%	0% erfüllt
TRNSYS	-	-1%	1%	-1%	-1%	-3%	-2%	6%	-1%	-1%	-1%	-1% erfüllt

Abbildung 4.3: Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme der Variante 04

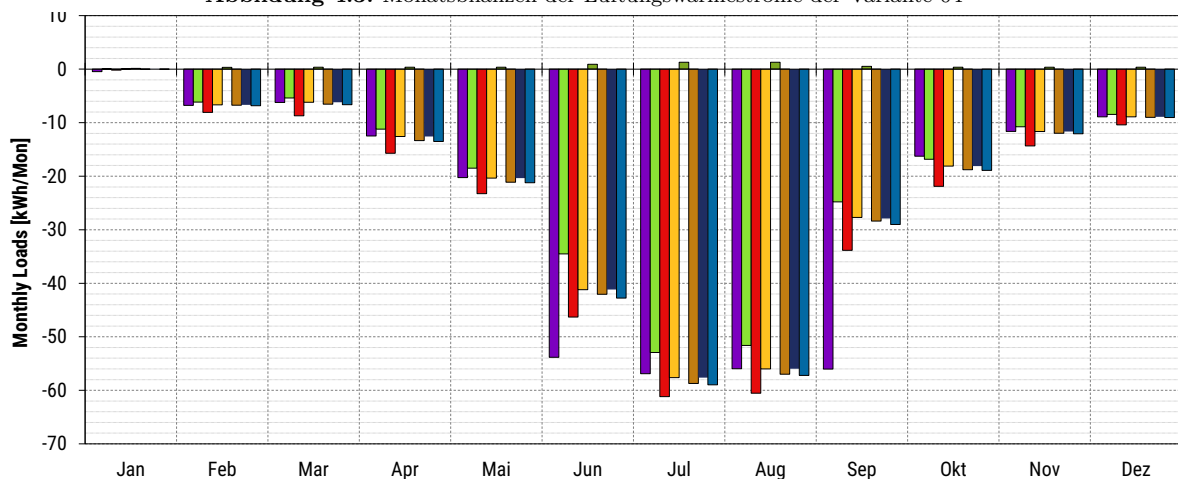


Tabelle 4.3: Monatsbilanzen der Lüftungswärmeströme der Variante 04

Variante 04	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Aixlib	-0.46	-6.76	-6.22	-12.49	-20.26	-53.83	-56.89	-55.98	-56.03	-16.27	-11.63	-8.91
ETU	0.04	-6.14	-5.38	-11.19	-18.51	-34.51	-52.93	-51.62	-24.78	-16.82	-10.76	-8.44
IDAICE	-0.18	-8.09	-8.71	-15.70	-23.26	-46.31	-61.17	-60.55	-33.85	-21.89	-14.34	-10.42
NANDRAD	0.03	-6.65	-6.19	-12.57	-20.36	-41.18	-57.64	-55.98	-27.72	-18.12	-11.66	-8.90
TAS	0.13	0.34	0.37	0.36	0.37	0.91	1.29	1.28	0.53	0.37	0.36	0.37
THERAKLES	-0.01	-6.74	-6.53	-13.34	-21.11	-42.07	-58.72	-56.98	-28.37	-18.80	-11.98	-8.99
THERAKLES_MEAN	0.03	-6.65	-6.19	-12.57	-20.36	-41.16	-57.62	-55.96	-27.90	-18.11	-11.66	-8.90
TRNSYS	-0.01	-6.81	-6.63	-13.49	-21.21	-42.76	-58.99	-57.21	-29.01	-18.93	-12.07	-9.05

Differenz	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Aixlib	-	2%	0%	-1%	0%	31%	-1%	0%	101%	-10%	0%	0% ---
ETU	-	-8%	-13%	-11%	-9%	-16%	-8%	-8%	-11%	-7%	-8%	0% ---
IDAICE	-	22%	41%	25%	14%	13%	6%	8%	21%	21%	23%	17% ---
NANDRAD	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%	0%	0%	0% erfüllt
TAS	-	-105%	-106%	-103%	-102%	-102%	-102%	-102%	-102%	-102%	-103%	-104% ---
THERAKLES	-	1%	5%	6%	4%	2%	2%	2%	2%	4%	3%	1% erfüllt
THERAKLES_MEAN	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0% erfüllt
TRNSYS	-	2%	7%	7%	4%	4%	2%	2%	4%	5%	4%	2% erfüllt

10

4.2 absolute Abweichungskriterien

Weiterhin wird für zwei Testtage vom 31.07 bis 02.08 eine maximale absolute Abweichung von $\Delta T < 0.3 K$ definiert. Diese Auswertung ist in Tab. 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Absolute Abweichungen für definierte Testpunkte für alle Varianten

Variante 01	5069.0 h	5070.0 h	5071.0 h	5074.0 h	5075.0 h	5078.0 h	5079.0 h	5080.0 h	5090.0 h	5091.0 h	5092.0 h	
Aixlib	14.16	14.17	14.17	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.24	14.24	14.24	
ETU	14.27	14.28	14.28	14.29	14.29	14.31	14.31	14.32	14.35	14.35	14.35	
IDAICE	14.20	14.21	14.21	14.22	14.23	14.24	14.24	14.24	14.28	14.28	14.29	
NANDRAD	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.21	14.21	14.21	14.25	14.25	14.26	
TAS	14.17	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.21	14.21	14.24	14.25	14.25	
THERAKLES	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.21	14.21	14.21	14.25	14.25	14.26	
THERAKLES_MEAN	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.21	14.21	14.21	14.25	14.25	14.26	
TRNSYS	14.27	14.28	14.28	14.28	14.28	14.29	14.30	14.30	14.35	14.35	14.35	
16	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00	26.00	27.00	28
Difference	5069.0 h	5070.0 h	5071.0 h	5074.0 h	5075.0 h	5078.0 h	5079.0 h	5080.0 h	5090.0 h	5091.0 h	5092.0 h	
Aixlib	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02 erfüllt	
ETU	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09 erfüllt	
IDAICE	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03 erfüllt	
NANDRAD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 erfüllt	
TAS	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01 erfüllt	
THERAKLES	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 erfüllt	
THERAKLES_MEAN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 erfüllt	
TRNSYS	0.09	0.10	0.10	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09 erfüllt	
Variante 02	5069.0 h	5070.0 h	5071.0 h	5074.0 h	5075.0 h	5078.0 h	5079.0 h	5080.0 h	5090.0 h	5091.0 h	5092.0 h	
Aixlib	14.16	14.17	14.17	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.24	14.24	14.24	
ETU	14.27	14.28	14.28	14.29	14.29	14.31	14.31	14.32	14.35	14.35	14.35	
IDAICE	14.20	14.21	14.21	14.22	14.23	14.24	14.24	14.24	14.28	14.28	14.29	
NANDRAD	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.21	14.21	14.21	14.25	14.25	14.26	
TAS	14.17	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.21	14.21	14.24	14.25	14.25	
THERAKLES	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.21	14.21	14.21	14.25	14.25	14.26	
THERAKLES_MEAN	14.18	14.18	14.19	14.20	14.20	14.21	14.21	14.21	14.25	14.25	14.26	
Difference	5069.0 h	5070.0 h	5071.0 h	5074.0 h	5075.0 h	5078.0 h	5079.0 h	5080.0 h	5090.0 h	5091.0 h	5092.0 h	
Aixlib	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02 erfüllt	
ETU	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09 erfüllt	
IDAICE	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03 erfüllt	
NANDRAD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 erfüllt	
TAS	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01 erfüllt	
THERAKLES	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 erfüllt	
THERAKLES_MEAN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 erfüllt	
TRNSYS	0.09	0.10	0.10	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09 erfüllt	
2	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14
Variante 03	5069.0 h	5070.0 h	5071.0 h	5074.0 h	5075.0 h	5078.0 h	5079.0 h	5080.0 h	5090.0 h	5091.0 h	5092.0 h	
Aixlib	17.93	17.93	17.94	18.11	18.16	18.26	18.28	18.31	17.72	17.64	17.60	
ETU	17.58	17.65	17.76	17.92	17.94	18.05	18.06	18.05	17.48	17.45	17.46	
IDAICE	17.75	17.92	17.93	18.12	18.12	18.23	18.25	18.24	17.67	17.60	17.64	
NANDRAD	17.57	17.54	17.72	17.92	17.91	18.04	18.05	18.03	17.48	17.41	17.47	
TAS	17.51	17.48	17.64	17.86	17.84	17.97	17.99	17.97	17.42	17.35	17.41	
THERAKLES	17.57	17.55	17.72	17.92	17.91	18.04	18.05	18.03	17.48	17.42	17.47	
THERAKLES_MEAN	17.57	17.55	17.72	17.92	17.91	18.04	18.05	18.03	17.48	17.42	17.47	
TRNSYS	17.60	17.57	17.75	17.95	17.94	18.07	18.09	18.07	17.52	17.45	17.50	
Difference	5069.0 h	5070.0 h	5071.0 h	5074.0 h	5075.0 h	5078.0 h	5079.0 h	5080.0 h	5090.0 h	5091.0 h	5092.0 h	
Aixlib	0.36	0.33	0.21	0.20	0.24	0.23	0.23	0.28	0.24	0.21	0.14 erfüllt	
ETU	0.01	0.05	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00 erfüllt	
IDAICE	0.18	0.32	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18 erfüllt	
NANDRAD	0.00	0.06	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01 erfüllt	
TAS	0.06	0.12	0.09	0.05	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.05 erfüllt	
THERAKLES	0.00	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01 erfüllt	
THERAKLES_MEAN	0.00	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01 erfüllt	
TRNSYS	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.04 erfüllt	
Variante 04	6048.0 h	6049.0 h	6050.0 h	6051.0 h	6052.0 h	6053.0 h	6054.0 h	6055.0 h	6056.0 h	6057.0 h	6058.0 h	
Aixlib	18.47	18.45	18.50	18.53	18.52	18.51	18.45	18.37	18.36	18.46	18.84	
ETU	19.37	19.37	19.36	19.35	19.34	19.31	19.29	19.28	19.33	19.43	19.52	
IDAICE	19.88	19.88	19.87	19.86	19.85	19.82	19.79	19.77	19.78	19.86	19.91	
NANDRAD	19.62	19.62	19.62	19.60	19.59	19.57	19.54	19.52	19.54	19.62	19.66	
TAS	19.63	19.63	19.63	19.61	19.60	19.57	19.54	19.53	19.54	19.62	19.66	
THERAKLES	19.69	19.69	19.69	19.68	19.67	19.64	19.61	19.59	19.61	19.69	19.73	
THERAKLES_MEAN	19.62	19.61	19.62	19.61	19.59	19.58	19.55	19.52	19.52	19.57	19.63	
TRNSYS	19.64	19.64	19.64	19.62	19.61	19.59	19.55	19.54	19.55	19.64	19.67	
Difference	6048.0 h	6049.0 h	6050.0 h	6051.0 h	6052.0 h	6053.0 h	6054.0 h	6055.0 h	6056.0 h	6057.0 h	6058.0 h	
Aixlib	1.15	1.17	1.12	1.07	1.07	1.06	1.09	1.15	1.18	1.16	0.82 ---	
ETU	0.25	0.26	0.26	0.25	0.26	0.25	0.25	0.24	0.20	0.19	0.14 erfüllt	
IDAICE	0.26	0.25	0.25	0.26	0.25	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24	0.25 erfüllt	
NANDRAD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 erfüllt	
TAS	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00 erfüllt	
THERAKLES	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07 erfüllt	
THERAKLES_MEAN	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.05	0.02 erfüllt	
TRNSYS	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01 erfüllt	

4.3 statistische Abweichungskriterien

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:

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

Diese Abweichungen sind in Tab. 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Statistische Auswertung aller überprüften Varianten

Variante 01	RMSE	nRMSE	CV(RMSE)	R	
Aixlib	0.010	0.020	0.1%	99.6%	erfüllt
ETU	0.100	0.170	0.7%	77.3%	---
IDAICE	0.030	0.050	0.2%	98.4%	erfüllt
NANDRAD	0.000	0.000	0.0%	100.0%	erfüllt
TAS	0.010	0.010	0.0%	99.9%	erfüllt
THERAKLES	0.000	0.000	0.0%	100.0%	erfüllt
THERAKLES	0.000	0.000	0.0%	100.0%	erfüllt
TRNSYS	0.090	0.150	0.6%	81.0%	erfüllt

Variante 02	RMSE	nRMSE	CV(RMSE)	R	0
Aixlib	0.140	0.040	0.7%	97.5%	erfüllt
ETU	0.030	0.010	0.1%	99.9%	erfüllt
IDAICE	0.020	0.010	0.1%	99.9%	erfüllt
NANDRAD	0.010	0.000	0.0%	100.0%	erfüllt
TAS	0.010	0.000	0.0%	100.0%	erfüllt
THERAKLES	0.010	0.000	0.0%	100.0%	erfüllt
THERAKLES_MEAN	0.010	0.000	0.0%	100.0%	erfüllt
TRNSYS	0.030	0.010	0.1%	99.9%	erfüllt

Variante 03	RMSE	nRMSE	CV(RMSE)	R	
Aixlib	0.240	0.110	1.4%	75.5%	---
ETU	0.050	0.030	0.3%	98.6%	erfüllt
IDAICE	0.200	0.100	1.1%	81.2%	erfüllt
NANDRAD	0.050	0.030	0.3%	98.8%	erfüllt
TAS	0.090	0.050	0.5%	96.4%	erfüllt
THERAKLES	0.050	0.030	0.3%	98.8%	erfüllt
THERAKLES_MEAN	0.050	0.030	0.3%	98.8%	erfüllt
TRNSYS	0.060	0.030	0.3%	98.5%	erfüllt

Variante 04	RMSE	nRMSE	CV(RMSE)	R	
Aixlib	1.240	0.580	6.7%	-487.4%	---
ETU	0.240	0.200	1.2%	21.2%	---
IDAICE	0.180	0.180	0.9%	9.8%	---
NANDRAD	0.000	0.000	0.0%	100.0%	erfüllt
TAS	0.020	0.020	0.1%	99.4%	erfüllt
THERAKLES	0.060	0.060	0.3%	94.1%	erfüllt
THERAKLES_MEAN	0.040	0.040	0.2%	96.5%	erfüllt
TRNSYS	0.100	0.090	0.5%	83.1%	erfüllt

4.4 Gesamtbewertung

Für die Programme NANDRAD, Therakles (mit der Ausgabe der Wärmeströme als Stundenmittelwerte THERAKLES MEAN), TRNSYS ergeben sich damit für alle Varianten (01, 02, 03, 04) die Erfüllung von 2 / 2 bzw. 3 / 3 Prüfkriterien.

Für das Program ETU Simulation ergeben sich die Erfüllung für Variante 01 von 1 von 2 Prüfkriterien, für die Variante 02 3 von 3 Prüfkriterien und für die Variante 03 3 / 3 Prüfkriterien sowie für die Variante 04 die Erfüllung von 2 / 3 Prüfkriterien. Für das Program AixLib ergeben sich die Erfüllung für Variante 01 von 2 von

2 Prüfkriterien, für die Variante 02 3 von 3 Prüfkriterien und für die Variante 03 1 / 3 Prüfkriterien sowie für die Variante 04 die Erfüllung von 0 / 3 Prüfkriterien. Bei ETU Simulation ergeben sich für die Variante 01 die Erfüllung von 1 / 2 Prüfkriterien, für Variante 02 die Erfüllung von 3 / 3 Prüfkriterien und für die Variante 03 die Erfüllung von 3 / 3 Prüfkriterien sowie für die Variante 04 die Erfüllung von 2 / 3 Prüfkriterien. Für IDA ICE ergeben sich für die Variante 01 die Erfüllung von 2 / 2 Prüfkriterien, für die Variante 02 die Erfüllung von 3 / 3 Prüfkriterien sowie für Variante 03 die Erfüllung von 1 von 3 Prüfkriterien sowie für die Variante 04 die Erfüllung von 1 / 3 Prüfkriterien.

Tabelle 4.6: Auswertung des Lüftungs-Testfalls

Variante 01	Monatsbilanzen	Absolute Abweichung	Statistische Abweichung	
Aixlib		erfüllt	erfüllt	2 / 2
ETU		erfüllt	---	1 / 2
IDAICE		erfüllt	erfüllt	2 / 2
NANDRAD		erfüllt	erfüllt	2 / 2
TAS		erfüllt	erfüllt	2 / 2
THERAKLES		erfüllt	erfüllt	2 / 2
THERAKLES_MEAN		erfüllt	erfüllt	2 / 2
TRNSYS		erfüllt	erfüllt	2 / 2
Variante 02	Monatsbilanzen	Absolute Abweichung	Statistische Abweichung	
Aixlib	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
ETU	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
IDAICE	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
NANDRAD	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
TAS	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
THERAKLES	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
THERAKLES_MEAN	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
TRNSYS	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
Variante 03	Monatsbilanzen	Absolute Abweichung	Statistische Abweichung	
Aixlib	---	erfüllt	---	1 / 3
ETU	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
IDAICE	---	erfüllt	erfüllt	2 / 3
NANDRAD	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
TAS	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
THERAKLES	---	erfüllt	erfüllt	2 / 3
THERAKLES_MEAN	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
TRNSYS	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
Variante 04	Monatsbilanzen	Absolute Abweichung	Statistische Abweichung	
Aixlib	---	---	---	0 / 3
ETU	---	erfüllt	---	1 / 3
IDAICE	---	erfüllt	---	1 / 3
NANDRAD	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
TAS	---	erfüllt	erfüllt	2 / 3
THERAKLES	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
THERAKLES_MEAN	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3
TRNSYS	erfüllt	erfüllt	erfüllt	3 / 3