



Dreidimensionale  
Wärmestromsimulation  
zur Ermittlung von

## **Wärmebrückenverlustkoeffizienten von Einbaugehäusen in Wärmedämmverbundsystemen**

Im Auftrag der Firma

**KAISER GmbH & Co. KG**

Ramsloh 4

58579 Schalksmühle

Germany

## **Kurzbericht zur Simulation**

Autor:  
Adrian Muskatewitz, M.Eng.

März 2017

## 1 Einleitung

Im Auftrag der Kaiser GmbH & Co. KG hat das Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist die Wärmebrückenverlustkoeffizienten und die raumseitigen Oberflächentemperaturen von Einbaugehäusen in Wärmedämmverbundsystemen ermittelt. Als Referenzwandaufbau zur Ermittlung der Wärmeverluste diente hierzu ein Wärmedämmverbundsystem. Das verwendete Referenzmodell stellt einen für den Einbaugehäusentypus anzutreffenden Systemaufbau dar. Der Auftraggeber stellte hierfür die erforderlichen Unterlagen zur Verfügung.

Passivhäuser stellen aufgrund der Möglichkeit auf ein separates Heizsystem zu verzichten, hohe Anforderungen an die Qualität der verwendeten Bauteile. Neben einer exzellenten Wärmedämmung, hoher Luftdichtheit, hocheffizienter Wärmerückgewinnung und Passivhausfenstern ist die Wärmebrückenfreiheit der thermischen Hülle von herausragender Bedeutung für die Funktionsfähigkeit des Passivhauses.

## 2 Vorgaben zur Wärmestromberechnung

Die Berechnungen wurden mit der Software SOLIDO der Firma Physibel, Belgien durchgeführt.

Tabelle 1 listet die in der Berechnung verwendeten Materialien und deren Wärmeleitfähigkeiten in Verbindung mit denen für die Darstellung gewählten Farbe auf. Quellen für die Wärmeleitfähigkeiten sind einschlägige Normen und die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Datenblätter.

Type	CEN-rule	Name	Pat.	Mesh	$\lambda$ [W/mK]	$\epsilon$ [-]	$\theta$ [°C]	h [W/m²K]
MATERIAL		HIPS		100.00	0.220			
MATERIAL		Waermedaemmung		100.00	0.032			
MATERIAL		Glas		100.00	1.000			
MATERIAL		Schraube		100.00	17.000			
MATERIAL		Innenputz		100.00	0.510			
MATERIAL		Außenputz		100.00	0.700			
MATERIAL		Estrich		100.00	1.400			
MATERIAL		Trittschalldaemmung		100.00	0.060			
MATERIAL		Stahlbeton		100.00	2.300			
MATERIAL		Kabel_eq		100.00	15.000			
MATERIAL		Holz		100.00	0.130			
MATERIAL		NEOPOR		100.00	0.032			
BC_SIMPL	NIHIL	BCE		100.00			-10.0	25.00
BC_SIMPL	NIHIL	BCI - HFhorizontal		100.00			20.0	7.69
BC_SIMPL	NIHIL	BCI - HFvertikal		100.00			20.0	6.00
MATERIAL		Duebel		100.00	0.270			
MATERIAL		Luft		100.00	0.100			
MATERIAL		Luft		100.00	0.040			
MATERIAL		EQ		100.00	5.000			

Tabelle 1: Verwendete Materialien, Wärmeleitfähigkeiten und Farbzuoordnung

**Es wurden die folgenden Randbedingungen angesetzt:**

Außentemperatur: -10 °C  
 Wärmeübergangswiderstand außen: 0,04 m²K/W  
 Innentemperatur: 20 °C  
 Wärmeübergangswiderstand innen: 0,13 m²K/W  
 Wärmeübergangswiderstand vert.: 0,17 m²K/W

**3 Modellbildung**

Die Einbaugehäuse in Wärmedämmverbundsystemen wurden mit Hilfe eines zur Verfügung gestellten dreidimensionalen Zeichnungsmodells in ein für die FEM-Wärmestromsimulation benötigtes Rechenmodell konvertiert und in das Modell eines Fassadenaufbaus mit Wärmedämmverbundsystems eingesetzt.

**1 Standard-WDVS**

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R<sub>s</sub>:   
 außen R<sub>se</sub>:

Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite
1. Innenputz	0,600					15
2. Stahlbeton	2,300					175
3. Dämmung	0,032					160
4. Außenputz	0,700					15
5.						
6.						
7.						
8.						

Dicke [mm]

Summe **36,5** cm

U-Wert: **0,18912** W/(m²K)

**2 Standard-WDVS**

Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung

Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] innen R<sub>s</sub>:   
 außen R<sub>se</sub>:

Teilfläche 1	λ [W/(mK)]	Teilfläche 2 (optional)	λ [W/(mK)]	Teilfläche 3 (optional)	λ [W/(mK)]	Summe Breite
1. Innenputz	0,600					15
2. Stahlbeton	2,300					175
3. Dämmung	0,032					100
4. Außenputz	0,700					15
5.						
6.						
7.						
8.						

Dicke [mm]

Summe **30,5** cm

U-Wert: **0,29304** W/(m²K)

Abbildung 1: Wandaufbauten WDVS – Ermittlung des eindimensionalen Wärmedurchgangs

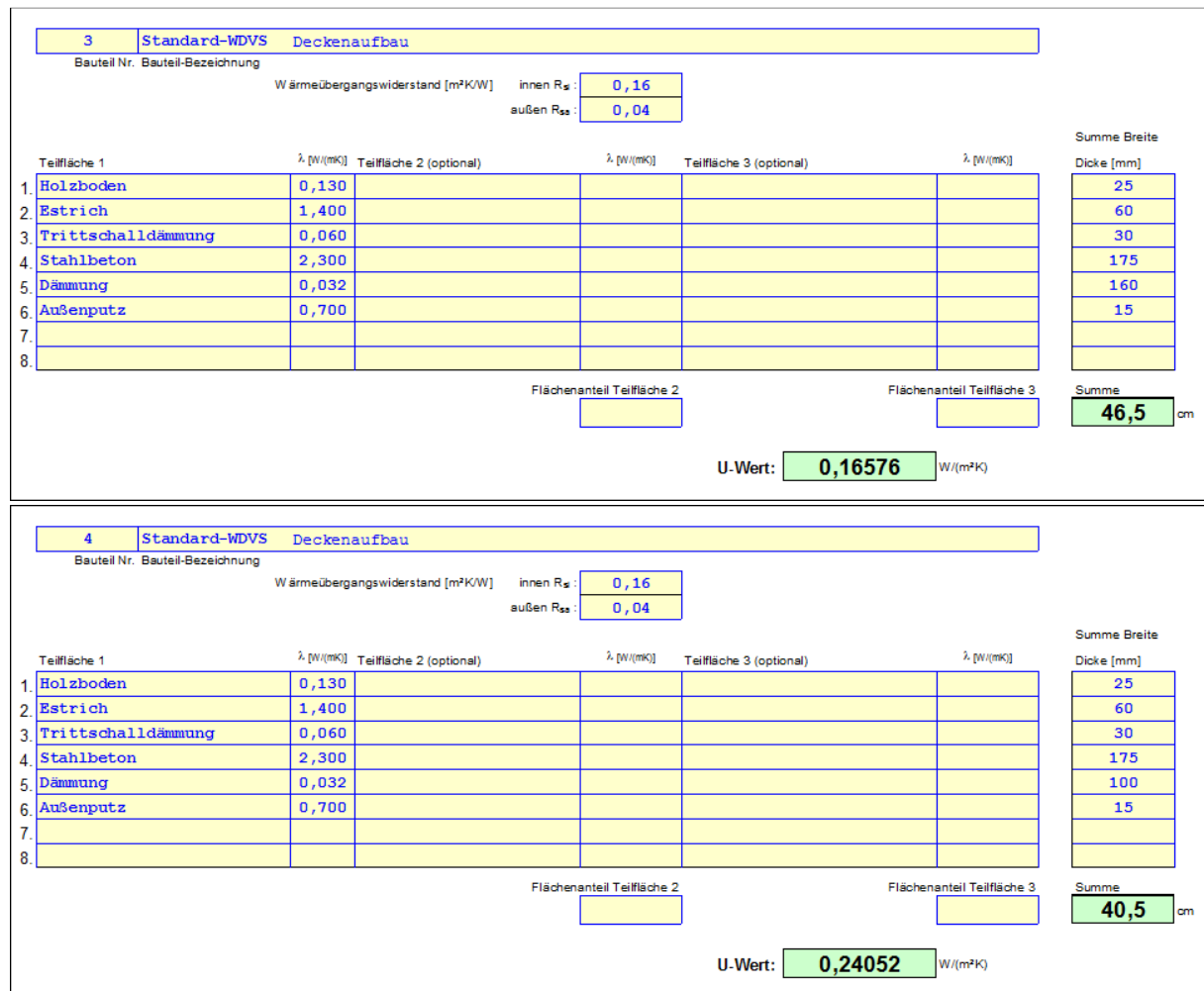


Abbildung 2: Deckenaufbauten WDVS – Ermittlung des eindimensionalen Wärmedurchgangs

Zur dreidimensionalen Wärmestromberechnung wurde das Modell durch ein dreidimensionales Netz in finite Elemente aufgeteilt. Im Bereich des Einbaugehäuses beträgt die Maschenweite des Netzes 0,5 x 0,5 x 0,5 mm. Sie nimmt zu den Rändern des Modells hin zu. Insgesamt umfasst das Modell ca. 6100000 Knotenpunkte.

Die verschiedenen Einbaugehäuse werden mit den Referenzwandaufbauten modelliert und deren punktueller Wärmebrückenverlustkoeffizient ( $\chi_{WB}$  in W/K) berechnet. Die Wärmebrückenverlustkoeffizienten berechnen sich aus der Differenz des eindimensionalen Wärmedurchgangs  $\Phi_{1D}$  des ungestörten Modells (vgl. Abb. 1 – WDVS), respektive dem Wärmestrom aus dem ungestörten Modell, und dem simulierten Wärmestrom des Wärmedämmverbundsystems mit Einbaugehäuse  $\Phi_{3D}$ .

Abbildung 3 zeigt das Gehäusemodell als modelliertes FEM-Simulationsmodell.

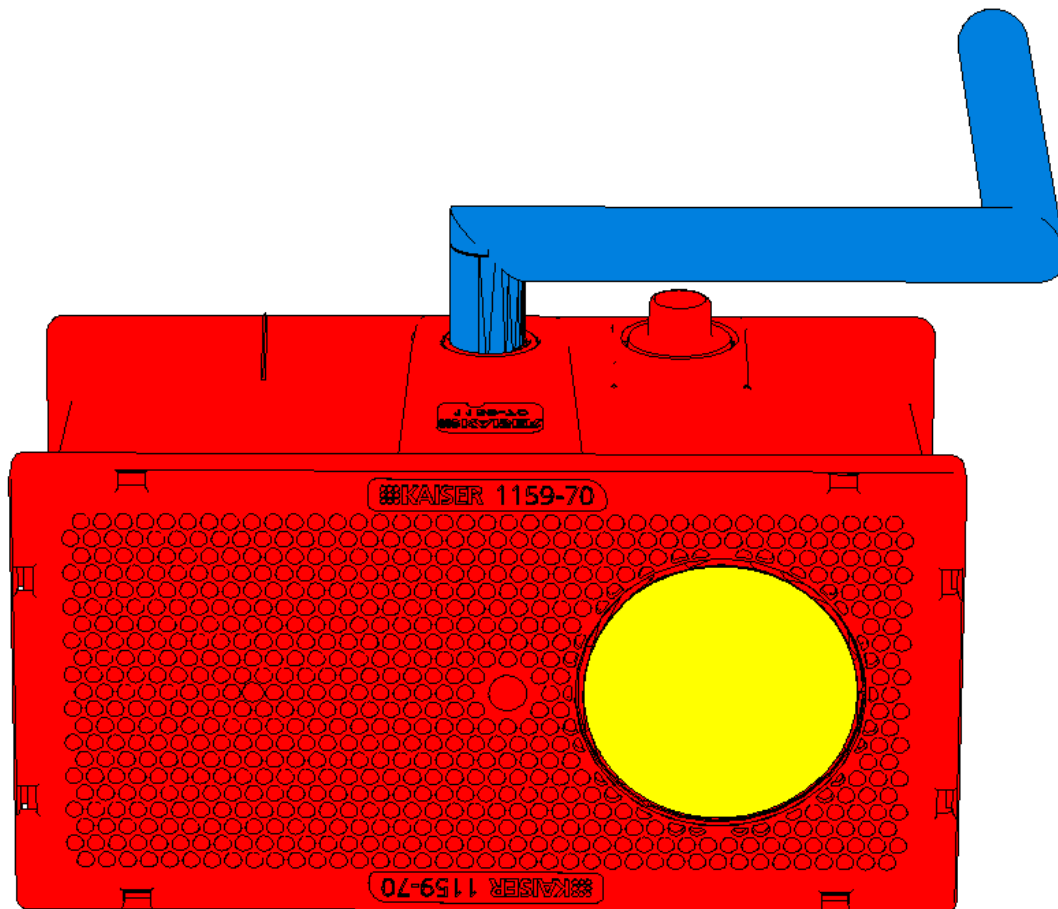


Abbildung 3: Berechnungsmodell Einbaueinheit in Wärmedämmverbundsystem

#### 4 Ergebnisse

Nachstehend sind die Ergebnisse der Wärmestromsimulation dokumentiert. Neben den Wärmebrückenverlustkoeffizienten wurden auch die minimalen Oberflächentemperaturen  $T_{\min}$  ermittelt. Diese sind bei  $-10^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur und  $20^{\circ}\text{C}$  operativer Raumtemperatur ermittelt.

Bei Einsatz der Leuchte im Einbaueinheit gem. Herstelleranleitung kann Kondensat oder erhöhte Schimmelgefahr an der raumseitigen Oberfläche ausgeschlossen werden. Mittels der FEM Simulation konnte ein  $f_{Rsi}$  Wert von 0,97 bei einer Dämmstärke von 160 mm ermittelt werden. Bei 100 mm Dämmstärke der regulären Dämmung beträgt der  $f_{Rsi}$  Wert 0,96.

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Mit	$\theta_{si}$ :	Min. Innenoberflächentemperatur aus Wärmestromsimulation [ $^{\circ}\text{C}$ ]
	$\theta_e$ :	Außentemperatur aus Wärmestromsimulation [ $^{\circ}\text{C}$ ]
	$\theta_i$ :	Innentemperatur aus Wärmestromsimulation [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Die Ermittlung der Wärmebrückenverlustkoeffizienten wurde in einem Wärmedämmverbundsystem mit einer Dämmebene, die eine Wärmeleitfähigkeit von 0,032 W/mK aufweist, durchgeführt. Bei geringerer Wärmeleitfähigkeit der regulären Dämmebene erhöhen sich die Wärmebrückenverlustkoeffizienten.

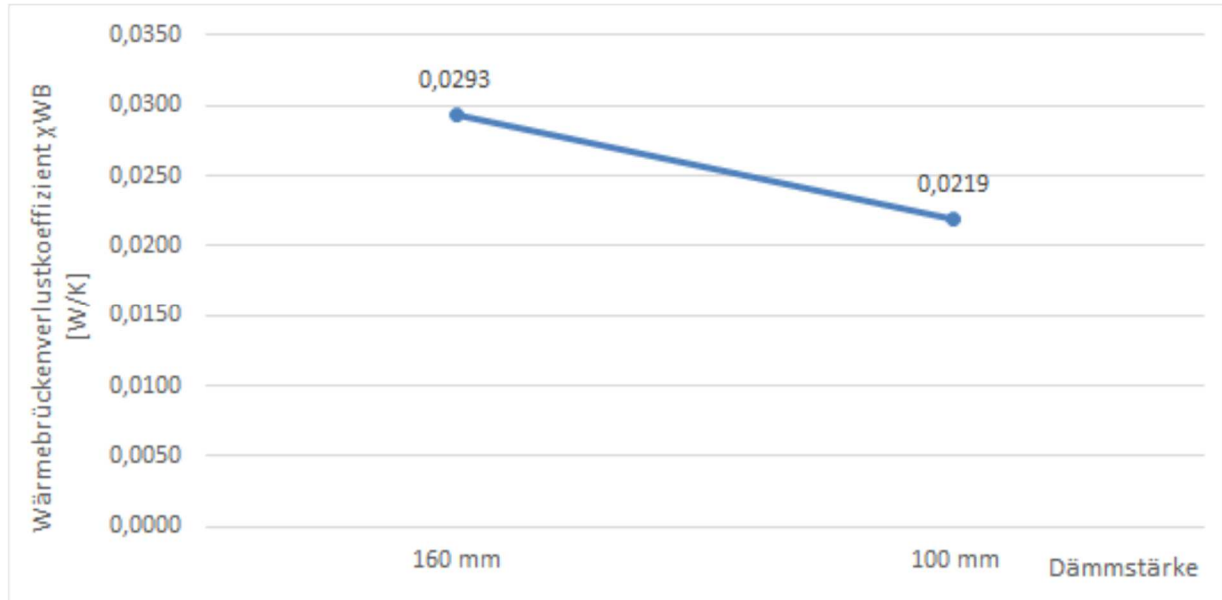


Diagramm 1: Ergebnisübersicht der FEM-Simulation

Hinweis: Wärmebrückenverlustkoeffizienten für die Dämmstärken zwischen 100 mm und 160 mm können näherungsweise dem Diagramm entnommen werden.

#### SOLIDO - Calculation Results

SOLIDO data file: 160\_opt.sld

Number of nodes = 3635602

Heat flow divergence for total object = 6.27527e-009

Heat flow divergence for worst node = 200

Col.	Type	Name	tmin [°C]	Node	tmax [°C]	Node
4	MATERIAL	HIPS	-10.04366	263396	16.57837	187188
6	MATERIAL	Waermedaemmung	-9.71980	63457	18.69229	18386
7	MATERIAL	Glas	-8.24220	2723634	-7.53927	2237817
11	MATERIAL	Schraube	15.41272	1759340	16.30406	1778739
20	MATERIAL	Innenputz	19.00848	2347370	19.53744	19218
44	MATERIAL	Außenputz	-9.83452	64308	-7.49681	1624377
79	MATERIAL	Estrich	18.49609	2194071	19.65599	19242
101	MATERIAL	Trittschalldaem	16.55509	2097867	19.62175	19241
104	MATERIAL	Stahlbeton	15.80685	1797405	19.42998	19230
106	MATERIAL	Kabel_eq	13.76520	1860978	17.17819	3556685
159	MATERIAL	Holz	18.65913	2174841	19.84227	19243
165	MATERIAL	NEOPOR	-3.69348	1334262	16.11366	166943
171	BC_SIMPL	BCE	-10.04366	263396	-7.76893	2547337
174	BC_SIMPL	BCI - HFhorizon	19.20445	2347508	19.53744	19218
175	BC_SIMPL	BCI - HFvertika	19.37693	2136356	19.84227	19243
181	MATERIAL	Duebel	15.80304	1778305	16.34549	1797983
192	MATERIAL	Luft	-9.41695	116891	16.69784	1229982
193	MATERIAL	Luft	-4.00652	1277104	16.60755	129459
200	MATERIAL	EQ	-6.01031	253236	-2.56476	3359203

Node	X	Y	Z
263396	400.00	546.25	562.20
187188	395.10	553.41	750.00
63457	300.00	482.50	590.00
18386	0.00	825.00	607.31
2723634	559.99	531.18	582.50
2237817	528.75	480.00	585.00
1759340	497.79	501.13	740.29
1778739	498.75	502.50	780.44
2347370	535.00	1000.00	747.82
19218	0.00	1250.00	735.00
64308	300.00	490.00	575.00
1624377	488.75	500.00	583.83
2194071	526.25	0.00	955.00
19242	0.00	1250.00	1015.00
2097867	520.00	0.00	925.00
19241	0.00	1250.00	955.00
1797405	500.00	497.50	750.00
19230	0.00	1250.00	750.00
1860978	503.61	548.75	726.83
3556685	636.36	584.62	884.73
2174841	525.00	0.00	1015.00
19243	0.00	1250.00	1040.00
1334262	470.00	486.25	720.22
166943	393.89	545.00	748.50
263396	400.00	546.25	562.20
2547337	548.75	500.00	582.50
2347508	535.00	1015.00	722.73
19218	0.00	1250.00	735.00
2136356	522.50	0.00	1040.00
19243	0.00	1250.00	1040.00
1778305	498.17	498.31	750.00
1797983	499.97	502.70	781.69
116891	390.76	445.31	584.14
1229982	462.76	588.75	750.00
1277104	466.25	491.25	719.04
129459	390.76	553.75	750.00
253236	400.27	457.91	589.11
3359203	600.77	541.25	719.04

Col.	Type	Name	ta [°C]	Flow in [W]	Flow out [W]
171	BC_SIMPL	BCE		0.00056	8.33197
174	BC_SIMPL	BCI - HFhorizon		5.22744	0.00000
175	BC_SIMPL	BCI - HFvertika		3.10390	0.00000

**SOLIDO - Calculation Results**

SOLIDO data file: 100\_opt.sld

Number of nodes = 2644232

Heat flow divergence for total object = 0.000237157

Heat flow divergence for worst node = 0.996053

Col.	Type	Name	tmin [°C]	Node	tmax [°C]	Node
4	MATERIAL	HIPS	-9.39332	96533	15.25927	159837
6	MATERIAL	Waermedaemmung	-9.53849	1474601	17.91506	12899
7	MATERIAL	Glas	-8.39476	1938965	-7.87590	1860251
11	MATERIAL	Schraube	14.07774	1275013	14.95761	1288772
20	MATERIAL	Innenputz	18.45705	1881656	19.28205	13623
44	MATERIAL	Außenputz	-9.69848	1365295	-7.63889	12809
79	MATERIAL	Estrich	17.83644	1746460	19.46983	13649

Dokumentation zur Wärmestromsimulation von Einbaugehäusen in WDVS – KAISER GmbH & Co. KG

101	MATERIAL	Trittschalldaem	15.04251	1651459	19.41676	13648
104	MATERIAL	Stahlbeton	14.47414	1302027	19.11523	13635
106	MATERIAL	Kabel_eq	12.22923	1346976	15.95936	2560633
159	MATERIAL	Holz	18.07104	1719333	19.75684	13650
165	MATERIAL	NEOPOR	-5.11733	973521	14.74434	145500
171	BC_SIMPL	BCE	-9.69848	1365295	-8.02552	1860249
174	BC_SIMPL	BCI - HFhorizon	18.75510	1922414	19.28205	13623
175	BC_SIMPL	BCI - HFvertika	19.10353	1732898	19.75684	13650
181	MATERIAL	Duebel	14.47156	1288475	14.99624	1302423
192	MATERIAL	Luft	-9.32825	110282	15.41055	899289
193	MATERIAL	Luft	-5.43949	810406	15.28575	118887
200	MATERIAL	EQ	-6.44100	206816	-4.05965	2407214

Node	X	Y	Z
96533	390.00	443.74	642.43
159837	395.10	553.41	750.00
1474601	516.25	362.00	650.00
12899	0.00	825.00	0.00
1938965	558.67	468.03	642.50
1860251	551.25	501.25	645.50
1275013	497.79	501.13	740.29
1288772	498.75	502.50	780.44
1881656	552.50	1000.00	746.56
13623	0.00	1250.00	735.00
1365295	506.25	346.00	635.00
12809	0.00	725.00	649.96
1746460	541.25	0.00	955.00
13649	0.00	1250.00	1015.00
1651459	532.50	0.00	925.00
13648	0.00	1250.00	955.00
1302027	500.00	497.50	750.00
13635	0.00	1250.00	750.00
1346976	503.61	548.75	726.83
2560633	632.99	586.67	884.73
1719333	538.75	0.00	1015.00
13650	0.00	1250.00	1040.00
973521	470.00	486.25	720.22
145500	393.89	545.00	748.50
1365295	506.25	346.00	635.00
1860249	551.25	501.25	642.50
1922414	556.25	1015.00	716.46
13623	0.00	1250.00	735.00
1732898	540.00	0.00	1040.00
13650	0.00	1250.00	1040.00
1288475	498.17	498.31	750.00
1302423	499.97	502.70	781.69
110282	390.76	445.26	644.16
899289	462.76	588.75	750.00
810406	455.00	495.00	719.04
118887	390.76	553.75	750.00
206816	400.27	457.91	649.11
2407214	600.77	541.25	719.04

Col.	Type	Name	ta [°C]	Flow in [W]	Flow out [W]
171	BC_SIMPL	BCE		0.00000	12.78671
174	BC_SIMPL	BCI - HFhorizon		8.24496	0.00000
175	BC_SIMPL	BCI - HFvertika		4.54145	0.00000



Auf der nachfolgenden Seite sind die Berechnungsmodelle und die dazugehörigen Isothermendarstellungen und Temperaturverläufe dargestellt.

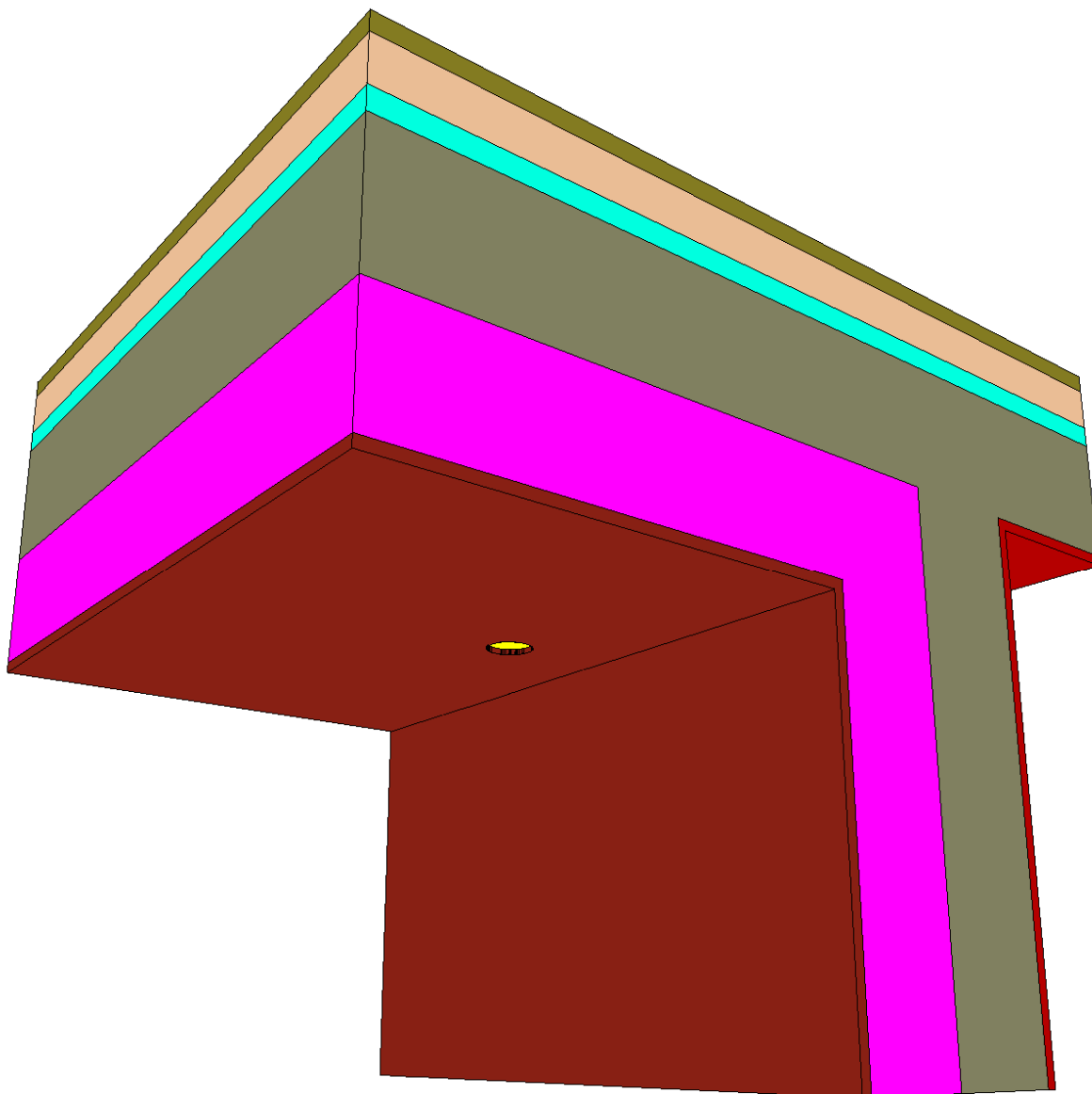


Abbildung 4: Modelldarstellung 160mm Dämmstärke

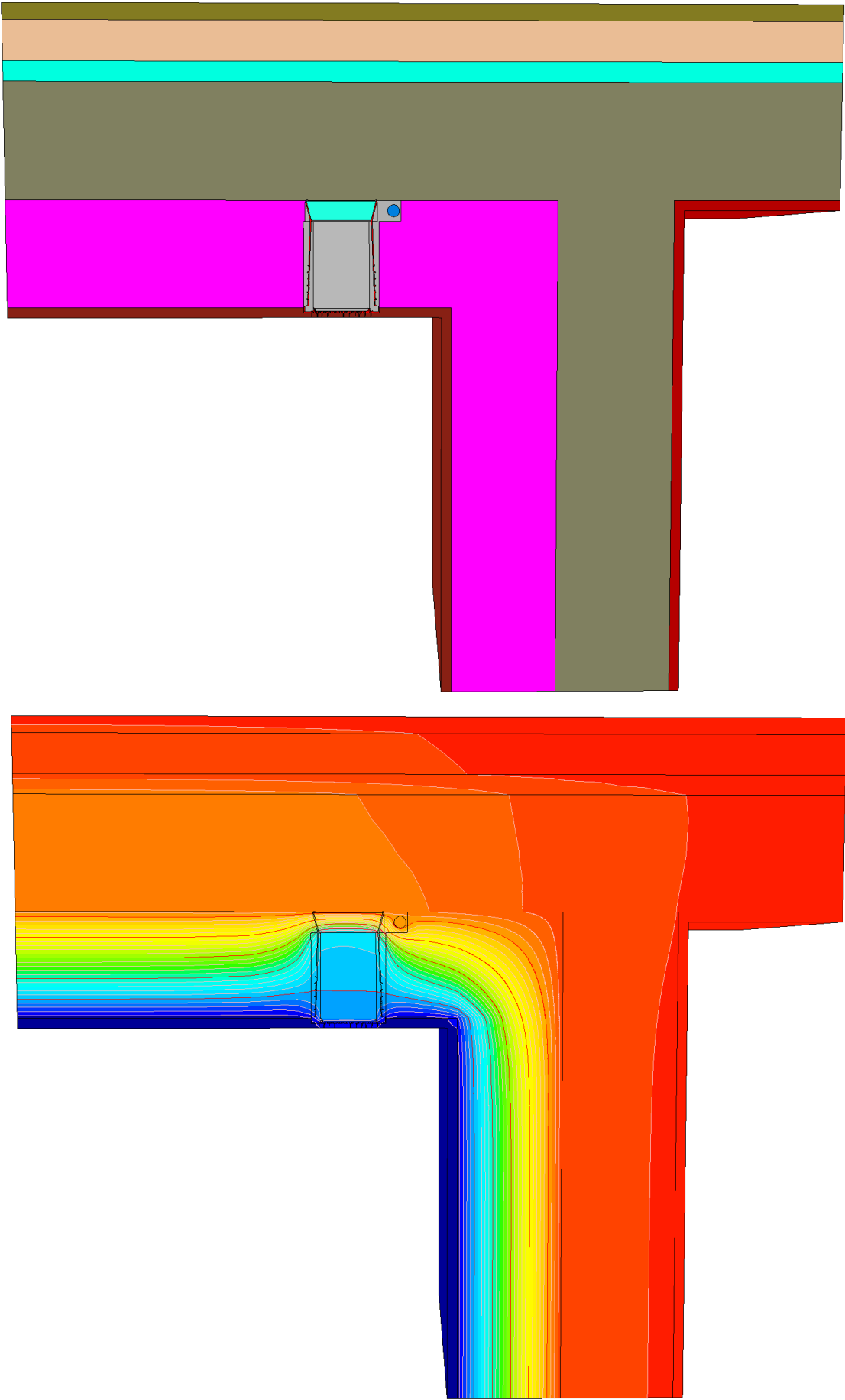


Abbildung 5: Material- und Isothermendarstellung Schnitt Vertikal (160 mm Dämmung)

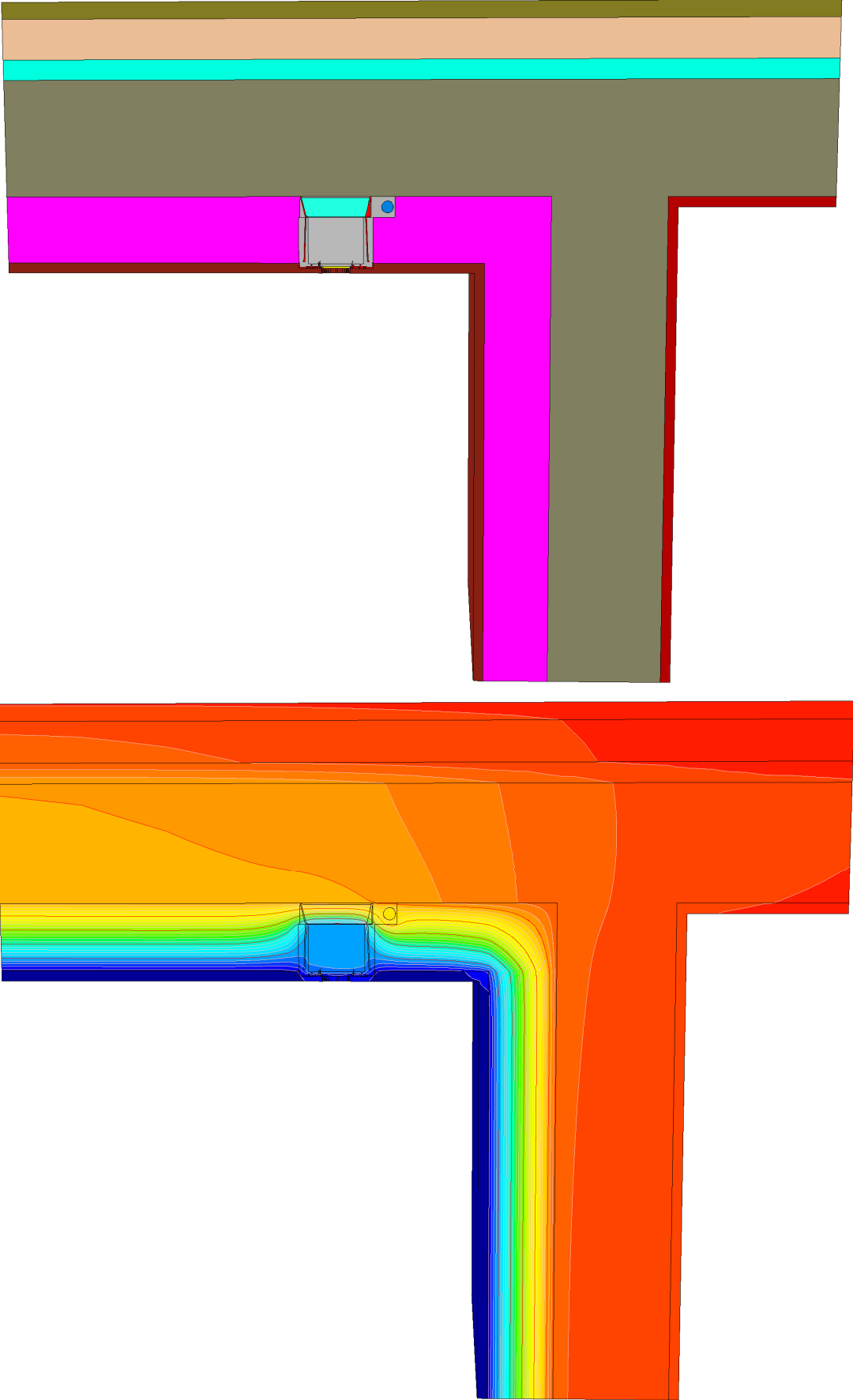


Abbildung 6: Material- und Isothermendarstellung Schnitt Vertikal (100 mm Dämmung)

<b>KAISER 160 mm Dämmstärke</b>	<b>hsi = 7,69, hse = 25</b>
T <sub>i</sub> [°C]	20,0
T <sub>a</sub> [°C]	-10,0
Q <sub>Solido, ungestört</sub> [W]	7,45221
Q <sub>Solido, WB</sub> [W]	8,33197
T <sub>min, WB</sub> [°C]	19,20
U <sub>Wand</sub> [W/(m²K)]	0,2484
χ <sub>WB</sub> [W/K]	0,0293
U <sub>eq WB</sub> [W/(m²K)]	0,2777
<b>Mod. 1 (Reihenendhaus)</b>	
Anzahl	60,00
Σ zusätzl. Verluste [W/K]	1,75952
Fläche (AW an Außenluft) [m²]	184,2
ΔU [W/m²K]	0,00955
Grenzwert wärmebrückenfrei [W/m²K]	0,010
Anforderung erfüllt?	ja
<b>Mod. 2 (Nichtwohngebäude)</b>	
Anzahl	290,00
Σ zusätzl. Verluste [W/K]	8,504346667
Fläche (AW an Außenluft) [m²]	867,9
ΔU [W/m²K]	0,00980
Grenzwert wärmebrückenfrei [W/m²K]	0,010
Anforderung erfüllt?	ja
<b>KAISER 100 mm Dämmstärke</b>	<b>hsi = 7,69, hse = 25</b>
T <sub>i</sub> [°C]	20,0
T <sub>a</sub> [°C]	-10,0
Q <sub>Solido, ungestört</sub> [W]	12,13059
Q <sub>Solido, WB</sub> [W]	12,78671
T <sub>min, WB</sub> [°C]	18,75
U <sub>Wand</sub> [W/(m²K)]	0,4044
χ <sub>WB</sub> [W/K]	0,0219
U <sub>eq WB</sub> [W/(m²K)]	0,4262
<b>Mod. 1 (Reihenendhaus)</b>	
Anzahl	80,00
Σ zusätzl. Verluste [W/K]	1,749653333
Fläche (AW an Außenluft) [m²]	184,2
ΔU [W/m²K]	0,00950
Grenzwert wärmebrückenfrei [W/m²K]	0,010
Anforderung erfüllt?	ja
<b>Mod. 2 (Nichtwohngebäude)</b>	
Anzahl	380,00
Σ zusätzl. Verluste [W/K]	8,310853333
Fläche (AW an Außenluft) [m²]	867,9
ΔU [W/m²K]	0,00958
Grenzwert wärmebrückenfrei [W/m²K]	0,010
Anforderung erfüllt?	ja

Tabelle 1: Übersicht der Simulationsergebnisse

## 5 Zusammenfassung

Das Einbaueinheitensystem der KAISER GmbH & Co.KG stellt eine gelungene Konstruktion hinsichtlich der geprüften Parameter dar. Die zusätzlichen Wärmeverluste durch die konstruktive Wärmebrücke sind auch im energetisch-hochwertigen Neubausegment kompensierbar und auch für die Verwendung bei Passivhäusern geeignet. Die Berücksichtigung in der Energiebilanzierung sollte dennoch stattfinden, insbesondere dann, wenn eine verhältnismäßig hohe Anzahl an Leuchten eingebaut wird. Raumseitiges Oberflächenkondensat, sowie Kaltluftabfall durch geringe Oberflächentemperaturen kann gem. dem untersuchten Aufbau ebenfalls ausgeschlossen werden. Die Oberflächentemperaturen liegen selbst bei  $-10^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur bei über  $19^{\circ}\text{C}$ . Dies entspricht nahezu der Oberflächentemperatur der ungestörten Wand.