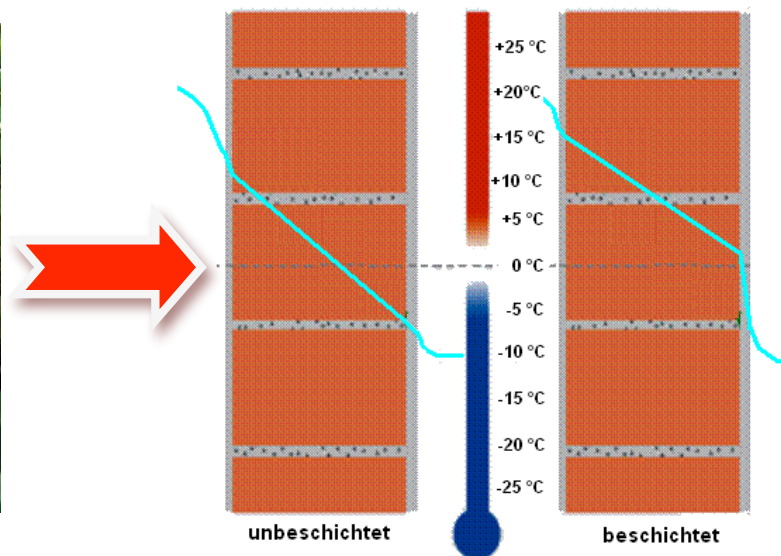


Ergebnisse der Temperaturmessungen an unbeschichteten und mit MIG-ESP Flüssigdämmung® beschichteten Probekörpern



Versuchsdurchführung:

Dipl.-Chem. Ing. Burkhard Brandt
ICT Ingenieurbüro für Chemie und Technologie
Von-Eichendorff-Str. 46a
D-33106 Paderborn

Versuchsauswertung:

Prof. Dr. sc. techn. Manfred Sohn
Erich-Kurz-Straße 7
D-10319 Berlin

INHALT

1. Vorbemerkung

2. Durchgeführte Messungen
 - 2.1 Prüfeinrichtung
 - 2.2 Prüfkörper
 - 2.3 Durchführung der Temperaturmessungen

3. Grundlagen der Auswertung
 - 3.1 Temperaturbedingungen an einem wärmedurchströmten Bauteil
 - 3.2 Zusammenhang zwischen Temperaturgradient und Wärmedurchgangskoeffizient
 - 3.3 Auswertungsprinzip
 - 3.4 Probleme

4. Ergebnisse der Auswertung

1 Vorbemerkung

In der Zeitschrift Energie KOMPAKT – Heft 6/2013- wurde ein sog. Mineralisches Passivhaus als Mehrgenerationenhaus vorgestellt. Mit Stolz wird in dem Beitrag angeführt, dass zum ersten Mal bei einem Mehrfamilien-Passivhaus ein 30 cm dickes, vollmineralisches Wärmedämm-Verbundsystem verwendet worden ist. Das Schema der Systemkomponenten zeigt Abbildung 1.

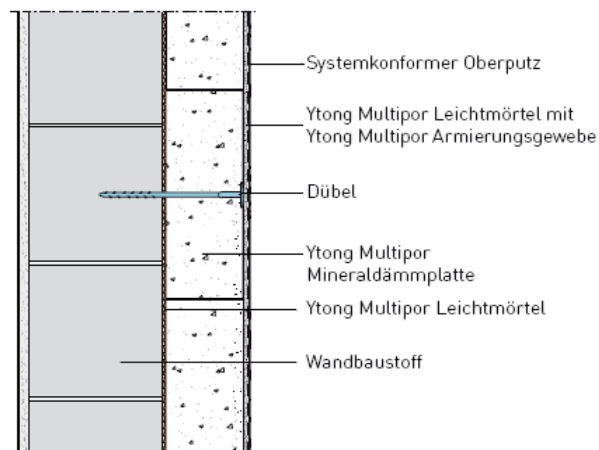


Abb. 1: Systemkomponenten des Ytong Multipor Wärmedämm-Verbundsystems

Dem Artikel können Angaben entsprechend Tabelle 1 entnommen werden:

Tabelle 1: Ausgewählte Angaben zum Gebäude

Fläche mineralisches WDVS Ytong Multipor	1.850,0	m ²
Dicke der Dämmung	30,0	cm
Volumen der eingesetzten Dämmung	555,0	m ³
Primärenergiebedarf für die Herstellung des Dämmstoffes	250,0	kWh/m ³
Primärenergiebedarf für die Dämmung des Gebäudes (Wände und Dach)	138.750,0	kWh
Primärenergiebedarf für die Wärmeversorgung des Gebäudes	14,0	kWh/(m ² .a)

Daraus leitet sich ab, dass das Mehrfamilienhaus allein mit dem Energieinhalt des Dämmstoffes für die Außenwände und das Dach fünf Jahre mit Wärme versorgt werden könnte (Heizung und Warmwasserbereitung).

Weiterhin kann bei einem solchen Konstruktionssystem kaum von materialökonomischer oder ökologischer Bauweise gesprochen werden, wenn Gesamtwanddicken bei den Außen-

wänden von ca. 60 cm mit damit verbundenen zusätzlichen Aufwendungen bei einem viergeschossigen Gebäude in Kauf genommen werden müssen.

Auch wenn durch ir-reflektierenden Beschichtungssystemen wie der MIG-ESP Flüssigdämmung® Dämmstoffe nicht grundsätzlich ersetzt werden können, so ist die Effizienz derartiger Beschichtungen im Hinblick auf die Senkung des Energiebedarfs von Gebäuden entschieden höher als die von Dämmstoffen.

Während für die Entwicklung und Weiterentwicklung von Dämmstoffen und Dämmsystemen umfangreiche Forschungs- und Entwicklungskapazitäten bei den Herstellern und in staatlichen Einrichtungen eingesetzt sind, ringen innovative ir-reflektierende Beschichtungssysteme in der Fachwelt nach wie vor um Akzeptanz. Um die Untersuchung der entsprechenden Stoffe und Stoffkombinationen kümmern sich die Hersteller selbst ohne staatliche Unterstützung oder Förderung. So sind auch die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse von Temperaturmessungen an unbeschichteten bzw. mit MIG-ESP Flüssigdämmung® beschichteten Bauteilen (Prüfkörper) in Eigeninitiative der MIG Material innovative Gesellschaft mbh durchgeführt, um weitere Grundlagen für die Planung von Baukonstruktionen zu schaffen.

Insbesondere geht es darum, die Wirkung der ir-reflektierenden Beschichtung auf die Größe des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen zu untersuchen. Die Basis dafür bilden umfangreiche Temperaturmessungen an Probekörpern, die in Verantwortung von Herrn Dipl.-Chem. Ing. Brandt von der ICT Ingenieurbüro für Chemie und Technologie im Zeitraum von Nov. 2012 bis April 2013 durchgeführt wurden.

Die Auswertung wurde unter Zugrundelegung bauphysikalischer Zusammenhänge des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Temperaturgradienten infolge des Wärmestromes durch ein Bauteil durch Prof. Dr. M. Sohn vorgenommen.

In der Art der Durchführung der Temperaturmessungen und der Auswertung besitzt das Ergebnis richtungsweisenden Wert für die Wirkung von ir-Beschichtungen von Bauteilen.

2 Durchgeführte Messungen

2.1 Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung ist so angelegt, dass beidseitig eines Prüfkörpers verschiedene Temperaturen eingestellt werden können, um im Prüfkörper entsprechend den physikalischen Gesetzmäßigkeiten einen definierten Temperaturgradienten zu erzeugen. Dazu besteht die Prüfeinrichtung aus einer Kühleinrichtung (Kühlschrank) und einer daran angeschlossenen Kammer für die Aufnahme des Prüfkörpers (s. Abb. 2).

In die Kammer wird der Prüfkörper eingesetzt, d.h. der Prüfkörper teilt die Kammer in zwei separate Teilkammern, die mit entsprechenden Temperaturmessfühlern für die Feststellung der Lufttemperatur ausgestattet sind. Weitere erforderliche Temperaturmessungen erfolgen auf den Oberflächen des Prüfkörpers.

Durch die Temperaturmessungen kann der Temperaturgradient durch den Prüfkörper nachgebildet werden, wenn es sich bei dem Prüfkörper um eine einschichtige Probe handelt.

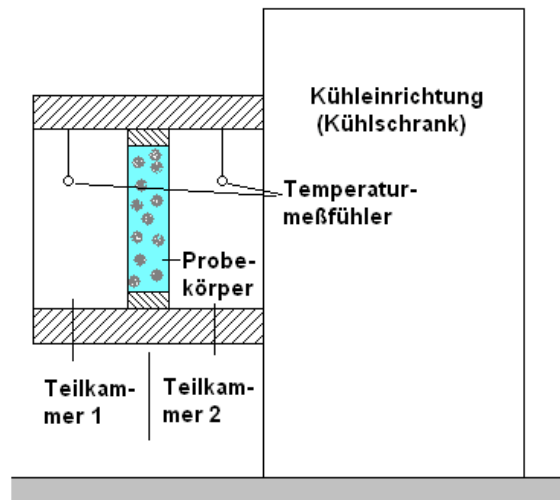


Abb. 2: Schema der Prüfeinrichtung

Damit sich ein möglichst stabiler Temperaturgradient einstellen kann, erfolgte jede Messung über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden.

2.2 Prüfkörper

Die Temperaturmessungen erfolgten an einschichtigen Prüfkörpern aus Porenbeton (Ytong). Abmessungen und Anordnung der Temperaturmessfühler auf den Oberflächen des Prüfkörpers zu den Teilkammern sind aus Abbildung 3 ersichtlich.

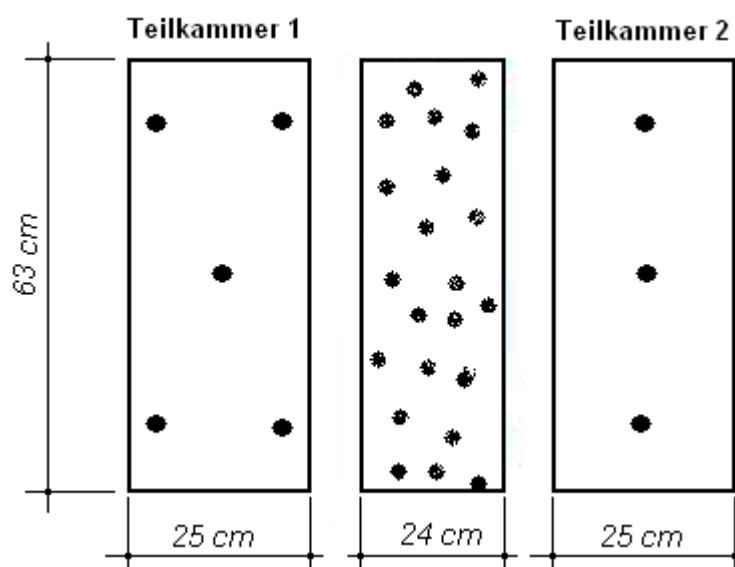


Abb. 3: Schema und Abmessungen der Prüfkörper und Anordnung der Temperaturmessfühler auf den Oberflächen

Dem Prüfkörper liegen folgende Daten zu Grunde (Angaben lt. Prüfkladde):

Länge/Höhe: $h = 63,00 \text{ cm}$

Breite: $b = 25,00 \text{ cm}$

Dicke: $d = 24,00 \text{ cm}$

Volumen: $V = 0,0378 \text{ m}^3$

Masse: $m = 16,03 \text{ kg}$

Rohdichte (berechnet): $\rho = 424 \text{ kg/m}^3$

Material: : Porenbeton (Ytong)

Da die konkrete Wärmeleitfähigkeit des Prüfkörpermaterials nicht bekannt ist, für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten aber benötigt wird, kann die Rohdichte als Basis für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit genutzt werden.

Den Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton und der Rohdichte zeigt unter Verwendung von Werten aus der DIN 4108-4 das Diagramm in Abb. 4.

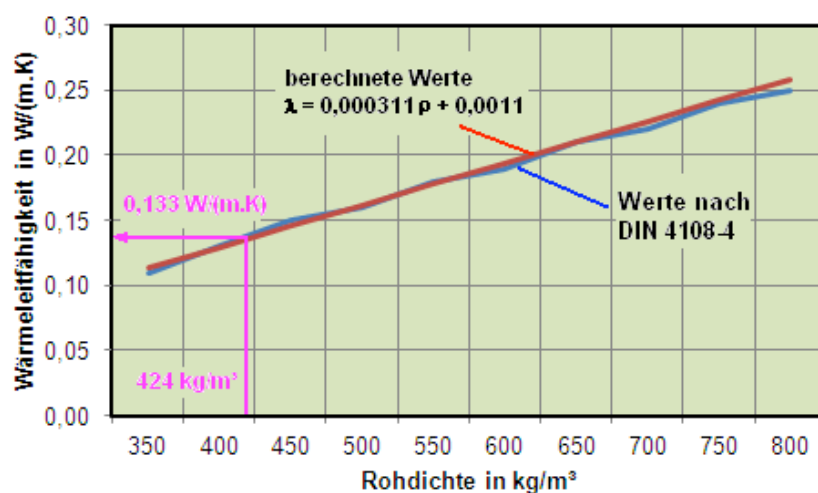


Abb. 4: Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton

Bei einer Rohdichte von 424 kg/m^3 ergibt sich der Nennwert der Wärmeleitfähigkeit für den Ytong-Planstein zu

$$\lambda_D = 0,133 \text{ W/(m.K)}$$

Gem. DIN 4108-4 errechnet sich daraus der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für den Probekörper zu:

$$\lambda = 1,2 \cdot \lambda_D = 1,2 \cdot 0,133 = 0,160 \text{ W/(m.K)}$$

Mit diesem Bemessungswert kann für den Probekörper ein Wärmedurchgangskoeffizient von

$$U_P = 1/(R_{si} + s/\lambda + R_{se}) = 1/(0,13 + 0,24/0,160 + 0,13)$$

$$\mathbf{U_P = 0,57 \text{ W/(m}^2\text{.K)}}$$

Bei der Berechnung des U-Wertes wurde beiderseitig von dem gleichen Wärmeübergangswiderstand ($R_{si} = R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{.K/W}$) ausgegangen. Dieser Wert muss dann auch bei der Auswertung der Temperaturmessungen verwendet werden, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Für die Temperaturmessungen wurden folgende Prüfkörper vorbereitet:

- | | |
|---------------------------------|-------|
| 1. Unbeschichtete Probe | (P 1) |
| 2. Unbeschichtete Probe | (P 2) |
| 3. Einseitig beschichtete Probe | (P 3) |
| 4. Einseitig beschichtete Probe | (P 4) |
| 5. Einseitig beschichtete Probe | (P 5) |
| 6. Einseitig beschichtete Probe | (P 6) |

Die Beschichtung der Proben erfolgte mit dem ir-reflektierenden Beschichtungsmaterial MIG-ESP Flüssigdämmung®.

2.3 Durchführung der Temperaturmessungen

Um für die Auswertung reproduzierbare Temperaturmesswerte zu erhalten, erfolgte die Messung erst, wenn sich beiderseits des Prüfkörpers stabile Temperaturen eingestellt hatten, d.h. die Prüfdauer für einen Probekörper nahm vom Zeitpunkt des Einfahrens der Temperatur bis zur Einstellung eines möglichst stabilen Temperaturgradienten durch den Prüfkörper einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden in Anspruch. Die Temperaturlaufzeichnungen erfolgten mit einem Zeitintervall von jeweils 5 Minuten von allen in Abb. 3 skizzierten Temperaturmessstellen einschließlich der korrespondierenden Lufttemperaturen in beiden Teilkammern der Prüfeinrichtung.

Aufgezeichnet wurden die Temperaturwerte in folgender Art:

a) Aufzeichnung der jeweiligen Maximalwerte jeder Messstelle

Für die Auswertung haben diese Werte keine Bedeutung, da sie lediglich die Temperatur zu Beginn des Einfahrens der Temperaturkurve darstellen. Z.B. lag die Lufttemperatur in Teilkammer 2 bei der Prüfung der Probe 1 bei 21,68 °C. Von diesem Wert wurde die Temperatur dann bis auf – 8,5 °C nach Ablauf von 24 Stunden runtergefahren (vgl. Abb. 5, Diagramm Lufttemperatur).

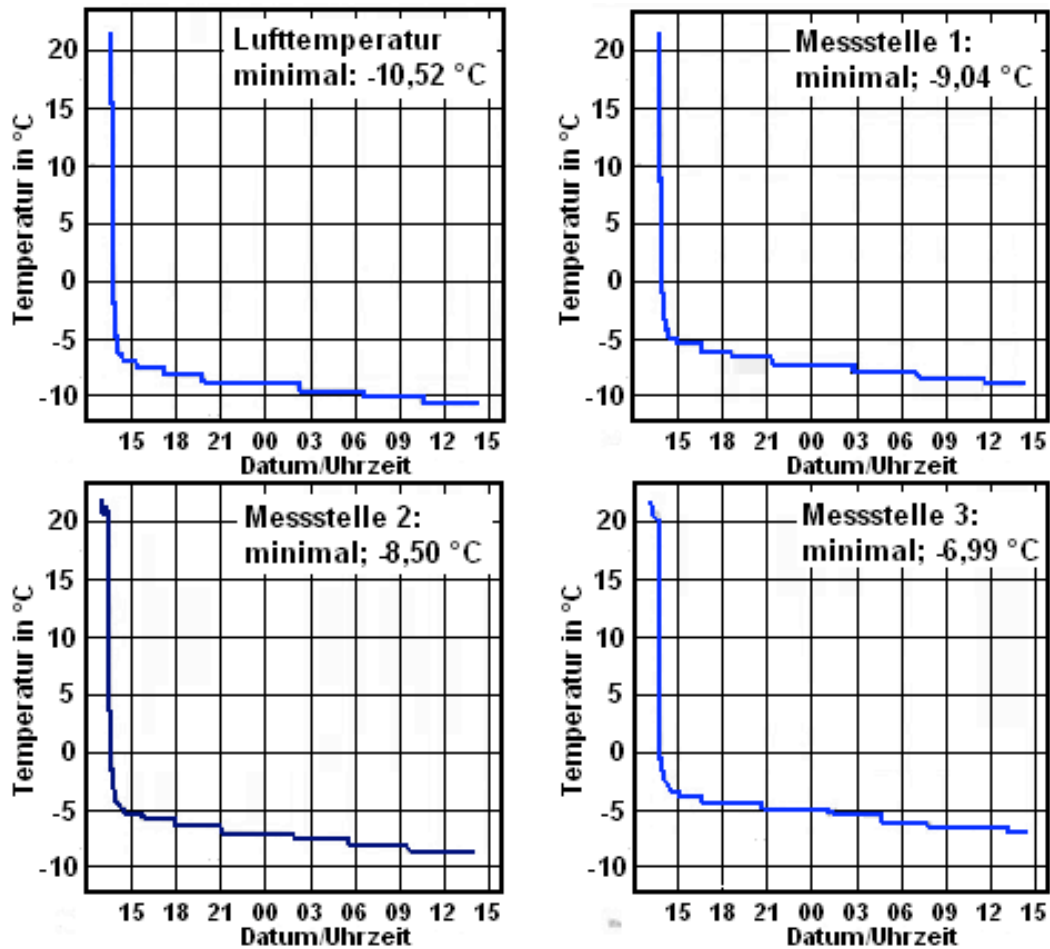


Abb. 5: Temperaturkurven einer unbeschichteten Probe (Probe 1) – Lufttemperatur und Oberflächentemperatur des Prüfkörpers auf der Seite der Teilkammer 2

b) Aufzeichnung der Minimaltemperatur jeder Messstelle

Diese Werte können für die Auswertung nur bedingt verwendet werden, da z.T. Werte nach dem Abschalten der Kühleinrichtung gemessen wurden, die wesentlich höher lagen als die eigentliche Minimaltemperatur. Die nichtverwertbaren Messwerte wurden zu Beginn der Auswertung als nicht relevant für die U-Wert-Berechnungen zu Beginn der Auswertung eliminiert

c) *Aufzeichnung der Durchschnittswerte jeder Messstelle*

Sämtliche Durchschnittswerte wurden in die Auswertung einbezogen worden, obwohl es empfehlenswert ist, ihre Relevanz für die Berechnung von U-Werten aus Temperaturmessungen vor der Durchführung weiterer Prüfungen nochmals kritisch zu hinterfragen.

d) *Aufzeichnung der Mean Kinetik Temperature (MKT) jeder Messstelle*

MKT ist eine berechnete konstante Temperatur, die den Effekt von Temperaturschwankungen über einen gewissen Zeitraum simuliert. Die MKT wurde in die Berechnungen der U-Werte einbezogen.

3 Grundlagen der Auswertung

3.1 Temperaturbedingungen an einem wärmedurchströmten Bauteil

Die Temperaturbedingungen an einem wärmedurchströmten Bauteil stehen in engem Zusammenhang mit den Bestandteilen der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert), die international in ISO 6946 normiert ist.

Der stationäre Wärmedurchgang (Transmission) durch ein Bauteil besteht im Allgemeinen aus drei Phasen:

- Wärmeübergang von der Raumluft mittels Luftströmung (Konvektion) und Wärmestrahlung von den Raumbooberflächen mittels Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) auf die raumseitige Wandoberfläche;
- Wärmetransport durch die Baustoffschicht selbst (mittels Wärmeleitung),
- Wärmeübergang (Wärmeabgabe) von der Außenoberfläche an die Außenluft mittels Konvektion und Wärmeleitung und an jene Oberflächen, die die Außenseite der Wand „sieht“, mittels Wärmestrahlung.

In allen Phasen wird der Wärmestrom ein gewisser Widerstand entgegengesetzt, den er überwinden muss: den Wärmeübergangswiderstand auf der Innenseite (R_{si}), den Wärmeleitwiderstand der Baustoffschicht (R_i), den Wärmeübergangswiderstand auf der Außenseite (R_{se}). Es handelt sich um eine Reihenschaltung von Widerständen. Wie beim elektrischen Strom ist der Gesamtwiderstand die Summe der Einzelwiderstände (in der Wärmelehre bezeichnet als Wärmedurchgangswiderstand, Formelzeichen R_T).

$$R_T = R_{si} + \sum_i R_i + R_{se} = R_{si} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}$$

Je größer der Wärmedurchlasswiderstand bzw. der Wärmedurchgangswiderstand ist, desto größer ist die Dämmwirkung der Baustoffschicht bzw. des Bauteils. Die Vorgänge beim Wärmetransport lassen sich gut mit der Analogie zum elektrischen Strom verdeutlichen. Dabei entspricht der elektrische Strom dem Wärmestrom, der elektrische Widerstand dem Wärmedurchlasswiderstand einer einzelnen Baustoffschicht, oder dem Wärmedurchgangswiderstand des ganzen Bauteils als Reihenschaltung von Widerständen. Die elektrische Spannung entspricht der Temperaturdifferenz zwischen der warmen und der kalten Seite. Sie stellt das treibende Potenzial dar, aufgrund dessen es überhaupt zum Wärmetransport kommt: Herrscht auf beiden Seiten des Bauteils die gleiche Temperatur, findet kein Wärmetransport statt.

Üblich ist im Bauwesen die Verwendung des Wärmedurchgangskoeffizienten U (U-Wert) des Bauteils, welcher der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstands ist.

Entsprechend dem Grundsatz der Thermodynamik strömt Wärme immer vom höheren zum niedrigeren Niveau – in diesem Falle ausgedrückt durch die Temperaturbedingungen – von der höheren Temperatur zur niedrigeren Temperatur (s. Abb. 6). Als Folge stellt sich durch das Bauteil ein Temperaturgradient ein, dessen Bestimmungsgrößen die o.g. Widerstandswerte sind.

3.2 Zusammenhang zwischen Temperaturgradient und Wärmedurchgangskoeffizient

Bei der Ermittlung des Temperaturgradienten durch das Bauteil wird allgemein von der Berechnung der Temperaturdifferenz zwischen zwei gegenüberliegenden Bauteilschichten unter Verwendung des Wärmeleitwiderstandes R der betrachteten Bauteilschicht ausgegangen (s. Abb. 6):

$$\vartheta_{s1} - \vartheta_{s2} = \Delta\vartheta_s = R \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)/R_T$$

Mit:	ϑ_{s1}	Oberflächentemperatur an Seite 1 der Baustoffschicht in °C
	ϑ_{s2}	Oberflächentemperatur an Seite 2 der Baustoffschicht in °C
	$\Delta\vartheta_s$	Temperaturdifferenz zwischen Schicht 1 und Schicht 2 in K
	R	Wärmeleitwiderstand der Baustoffschicht in m ² .K./W
		$R = s_i/\lambda_i$
	ϑ_i	Innentemperatur in °C
	ϑ_e	Außentemperatur in °C (oder Temperatur in einem unbeheizten angrenzenden Raum)
	R_T	Wärmedurchgangswiderstand in m ² .K./W.

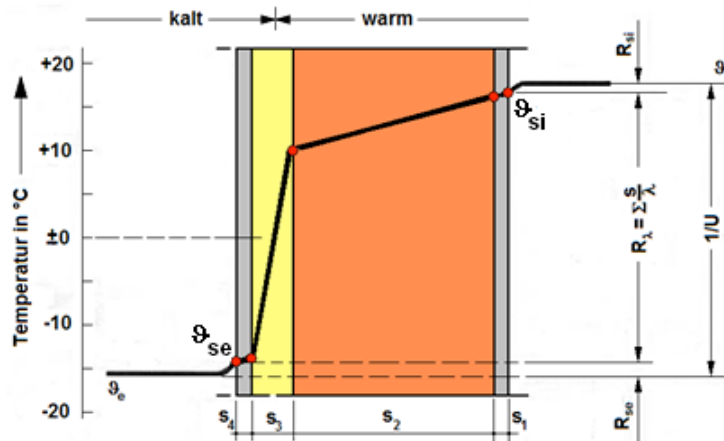


Abb. 6: Temperaturgradient durch ein mehrschichtiges Bauteil (z.B. Außenwand)

Anhand eines Beispiels soll dargestellt werden, wie der Temperaturverlauf in Bauteilen berechnet werden. Das gewählte Bauteil soll dabei folgende Parameter haben:

Außenwand bestehend aus 2 cm Innenputz mit $\lambda = 0,87 \text{ W/(m.K)}$ und eine Tragschale aus 30 cm Stahlbeton mit $\lambda = 2,1 \text{ W/(m.K)}$. Für diese Wand ergibt sich der Wärmedurchgangswiderstand zu

$$R_T = R_{si} + s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + R_{se} = 0,13 + 0,02/0,87 + 0,30/2,1 + 0,04 = 0,13 + 0,023 + 0,143 + 0,04$$

$$R_T = 0,336 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W.}$$

Daraus ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient zu

$$U = 1/R_T = 1/0,336$$

$$U = 2,98 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Die berechneten Temperaturen an den einzelnen Schichten des Bauteils nach obigem Beispiel sind in der Tabelle 2 und in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 2: Berechnung des Temperaturgradienten durch ein Außenwand

Lfd. Nr.	Formel	Werte	Temperatur der Schicht in °C
allgem.	$\Delta\vartheta_{\text{Sch}} = R_{\text{Sch}} \cdot \Delta\vartheta/R_T$		
	Innentemperatur ϑ_i		20,00
1	$\Delta\vartheta_{\text{Sch1}} = R_{si} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)/R_T$	$\Delta\vartheta_{\text{Sch1}} = 0,13 \cdot 30/0,336 = 11,61 \text{ K}$ $\vartheta_{\text{Sch1}} = \vartheta_i - \Delta\vartheta_{\text{Sch1}} = 20 - 11,61$	8,39
2	$\Delta\vartheta_{\text{Sch2}} = R_{\text{Sch2}} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)/R_T$	$\Delta\vartheta_{\text{Sch2}} = 0,023 \cdot 30/0,336 = 2,05 \text{ K}$	6,34

		$\vartheta_{Sch2} = \vartheta_{Sch1} - \Delta\vartheta_{Sch2} = 8,39 - 2,05$	
3	$\Delta\vartheta_{Sch3} = R_{Sch3} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) / R_T$	$\Delta\vartheta_{Sch3} = 0,143 \cdot 30 / 0,336 = 12,77 \text{ K}$ $\vartheta_{Sch3} = \vartheta_{Sch2} - \Delta\vartheta_{Sch3} = 6,34 - 12,77$	- 6,43
4	$\Delta\vartheta_{Sch4} = R_{se} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) / R_T$ entspr. Außentemperatur ϑ_e	$\Delta\vartheta_{Sch4} = 0,04 \cdot 30 / 0,336 = 3,57 \text{ K}$ $\vartheta_{Sch4} = \vartheta_{Sch3} - \Delta\vartheta_{Sch4} = -6,43 - 3,57$	- 10,00

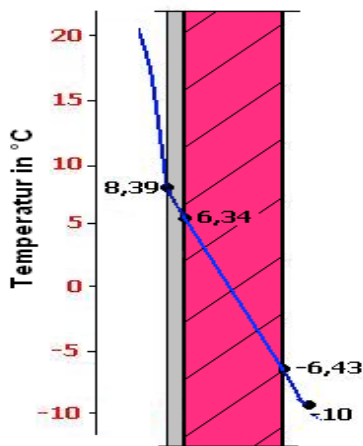


Abb. 7: Berechneter Temperaturgradient durch das Beispielbauteil

3.3 Auswertungsprinzip

Die Umkehrung der Vorgehensweise zur Berechnung des Temperaturgradienten durch ein Bauteil könnte für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U aus drei am Bauteil gemessenen Temperaturen - ϑ_i , ϑ_{si} und ϑ_e - genutzt werden.

Allgemein gilt: $\vartheta_{si} = \vartheta_i - U \cdot R_{si} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)$

Umkehrung: $U = (\vartheta_i - \vartheta_{si}) / [R_{si} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)]$

Mit den Daten des obigen Beispiels ergibt das einen Wärmedurchgangskoeffizienten von

$$U = (20 - 8,39) / [0,13 \cdot (20 + 10)]$$

$$U = 2,98 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}).$$

Im vorliegenden Fall wurden die U-Werte für die einzelnen Prüfkörper sowohl mit den Werten von Teilkammer 1 als auch mit den Werten der Teilkammer 2 berechnet und daraus eine Mittelwertbildung wie folgt vorgenommen:

$$U_m = 0,5 \cdot (\vartheta_{L1} - \vartheta_{s1}) / [R_{s1} \cdot (\vartheta_{L1} - \vartheta_{L2})] + 0,5 \cdot (\vartheta_{L2} - \vartheta_{s2}) / [R_{s2} \cdot (\vartheta_{L2} - \vartheta_{L1})]$$

Eine nach diesem Prinzip durchgeführte Beispielrechnung ist in Abbildung 8 dargestellt.

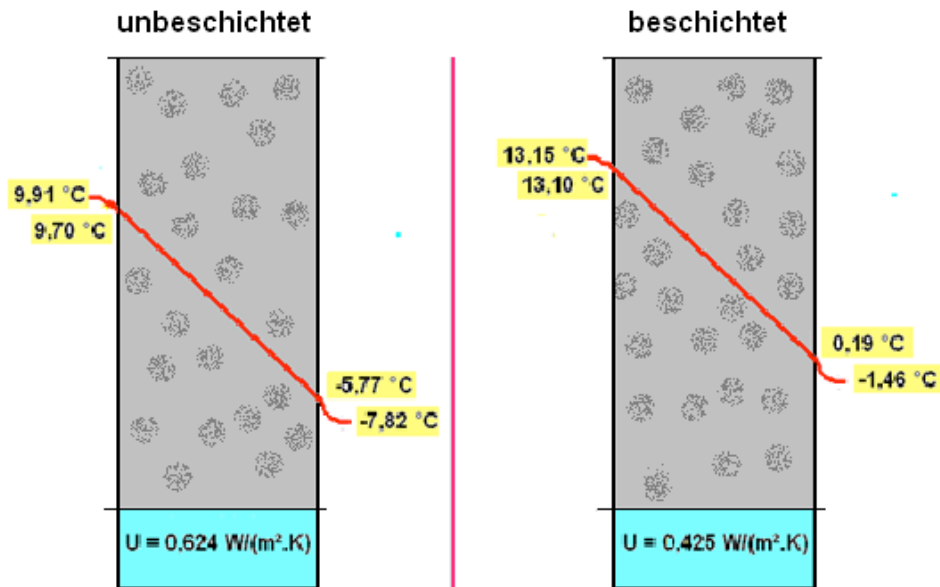


Abb.: 8: Berechnete U-Werte aus den an den Probekörpern (unbeschichtet und einfach beschichtet) gemessenen Temperaturen

Auf der Grundlage dieses bauphysikalischen Zusammenhangs sind die durch Herrn Brandt von der ICT durchgeführten Temperaturmessungen an unbeschichteten und mit MIG ESP Flüssigdämmung® beschichteten Probekörpern ausgewertet worden.

3.4 Probleme

In der Bauphysik werden bei der Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten U die in der DIN EN ISO 6946 (Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren) enthaltenen Wärmeübergangswiderstände verwendet.

Tabelle 3: Wärmeübergangswiderstände, in

		Richtung des Wärmestromes		
		aufwärts	horizontal	abwärts
m^2K/W	R_{si}	0,10	0,13	0,17
	R_{se}	0,04	0,04	0,04

Der Wärmeübergangswiderstand allgemein ergibt sich (näherungsweise) nach:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r}$$

Dabei ist: h_c der Wärmeübergangskoeffizient durch **Konvektion**;
 h_r der Wärmeübergangskoeffizient durch **Strahlung**.

Tabelle 4: Werte des Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung h_{r0} eines schwarzen Körpers

Temperatur °C	h_{r0} W/m ² K
-10	4,1
0	4,6
10	5,1
20	5,7
30	6,3

Bei Innenoberflächen ist $h_c = h_{ci}$

Dabei ist: für Wärmestrom aufwärts: $h_{ci} = 5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 für Wärmestrom horizontal: $h_{ci} = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 für Wärmestrom abwärts: $h_{ci} = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Bei Außenoberflächen ist $h_c = h_{ce}$ mit $h_{ce} = 4 + 4 \times v$, wobei v die Windgeschwindigkeit über der Oberfläche in m/s ist.

In Tabelle 5 sind verschiedene Werte des äußeren Wärmeübergangswiderstandes R_{se} für verschiedene Windgeschwindigkeiten angegeben.

Tabelle 5: Werte von R_{se} für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten

Windgeschwindigkeit m/s	R_{se} m ² K/W
1	0,08
2	0,06
3	0,05
4	0,04
5	0,04
7	0,03
10	0,02

Diese kurz gefassten Darlegungen zeigen, dass die Verwendung eines Pauschalwertes für den Wärmeübergangswiderstand von $R_s = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, wie er für die Innenseite von Außenwänden üblich ist, bei Untersuchungen zur Wirksamkeit ir-reflektierender Beschichtungen nur eine grobe Näherung darstellen kann. Dies geht auch aus den verschiedenen Näherungsbeziehungen gem. Tabelle 6 zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten

Hervor.

Tabelle 6: Näherungsformeln zur Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten .

Beschreibung	Art der Strömung	Wärmeübergangskoeffizient α (W/(m ² ·K))
Luft senkrecht zur Wand im Gebäude	laminare freie Konvektion	$1,32 \cdot (\Delta T / H)^{0,25}$
Luft senkrecht zur Wand im Gebäude	turbulente freie Konvektion	$1,74 \cdot \Delta T^{0,33}$
Luft senkrecht zur Wand außerhalb des Gebäudes	laminarer Luftstrom	$3,96 \cdot (v / L)^{0,5}$ wenn $v \cdot L < 8 \text{ m}^2/\text{s}$
Luft senkrecht zur Wand außerhalb des Gebäudes	turbulenter Luftstrom	$5,76 \cdot (v^4 / L)^{0,2}$ wenn $v \cdot L > 8 \text{ m}^2/\text{s}$
Luft längs zur Wand inner- u. außerhalb von Gebäuden	laminare Luftströmung	$3,9 \cdot (v / L)^{0,5}$ wenn $v \cdot L < 8 \text{ m}^2/\text{s}$
Luft längs zur Wand inner- u. außerhalb von Gebäuden	turbulente Luftströmung	$11/L + 5,8 \cdot [(L \cdot v - 8)/(L \cdot v)] \cdot (v^4/L)^{0,2}$ wenn $v \cdot L > 8 \text{ m}^2/\text{s}$

Vor Fortführung von Untersuchungen zur Berechnung von Wärmeübergangszahlen aus den Ergebnissen von Temperaturmessungen als Grundlage für die Bewertung der Wirksamkeit ir-reflektierender Beschichtungen sollte dieser Problemkomplex geklärt werden.

4 Ergebnisse der Auswertung

Die Auswertung erfolgte in folgenden Schritten

- a) *Bestimmung der Dichte, des Nennwertes und des Berechnungswertes der Wärmeleitfähigkeit des Probekörpers (s. Abschnitt 2.2).*
- b) *Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten des Probekörpers (unbeschichtet)*
(s. Abschn. 2.2)
- c) *Überprüfung der Messwerte auf Verwertbarkeit und Relevanz für die vorgesehenen Berechnungen*
- d) *Auswertung der Temperaturmessungen – Berechnung der U-Werte aus den Temperaturen am Prüfkörper (s. Anlage)*

Das Ergebnis der Berechnungen ist in der Tabelle 7 und der Grafik in Abbildung 9 zusammen gefasst.

Tabelle 7: Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Proben-Nr.	Beschreibung Angaben zur Beschichtung	Berechneter U-Wert in $W/(m^2 \cdot K)$	Mittlere U-Werte in $W/(m^2 \cdot K)$	Senkung gegenüber P1/P2 in %
P	bauphysikalisch berechnet	0,570	0,570	
P 1	unbeschichtete	0,592	0,569	100,00
P 2	unbeschichtete	0,545		
P 3	einseitig beschichtete	0,290	0,348	38,83
P 4	einseitig beschichtete	0,323		
P 5	einseitig beschichtete	0,405		
P 6	einseitig beschichtete	0,374		

Aus der Tabelle kann bereits abgelesen werden, dass die Beschichtung des Prüfkörpers mit dem ir-reflektierenden Beschichtungsmaterial MIG-ESP Flüssigdämmung® erheblichen Einfluss auf die Höhe des Wärmedurchgangskoeffizienten eines Bauteiles hat.

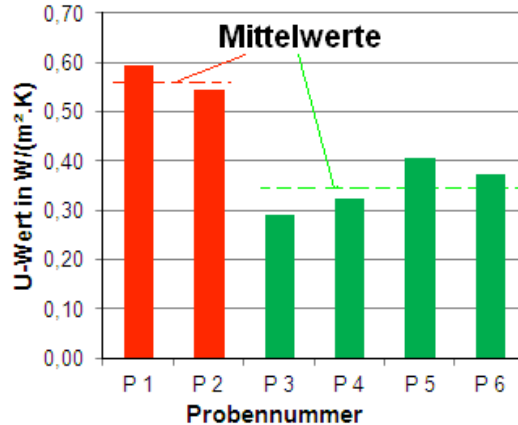


Abb. 9: Grafische Darstellung der berechneten U-Werte

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- a) Der aus den Temperaturmessungen berechnete U-Wert für die unbeschichtete Probe stimmt relativ gut mit dem bauphysikalisch berechneten U-Wert (s. Abschn. 2.2) überein:

U-Wert bauphysikalisch berechnet:

$$U = 0,570 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$$

U-Wert auf Basis Bauteiltemperaturen berechnet: $U = 0,569 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Die Abweichung liegt lediglich bei $0,01 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die U-Wert-Berechnung aus den am Bauteil gemessenen Temperaturen eine hohe Relevanz hat. Voraussetzung dabei ist jedoch, dass die Temperaturmessfühler sehr genau sind und bei der gleichen Temperatur auch den gleichen Wert anzeigen.

- b) Gegenüber dem unbeschichteten Zustand der Probe weisen die einseitig beschichteten Proben einen – im Durchschnitt – um 38,8 % kleineren U-Wert auf, was allein auf die ir-reflektierende Wirkung des Beschichtungsmaterials zurückgeführt werden kann. In früheren Untersuchungen wurde in die Berechnung der U-Werte unter Einbeziehung einer ir-reflektierenden Beschichtung auch noch die austrocknende Wirkung auf die Baustoffe durch das Beschichtungsmaterial einbezogen, wodurch U-Wertabsenkungen um ca. 27 % berechnet werden konnten. Die Untersuchungen scheinen aber zu belegen, dass derartige U-Wert-Reduzierungen allein durch die ir-reflektierende Wirkung der Beschichtung erreicht werden könnten. Unter diesem Gesichtspunkt wird es erforderlich sein, die in der Studie „*Ableitung gesicherter und nachweisfähiger Berechnungswerte für IR-Reflexionsgrade sowie Austrocknungsfaktoren von Beschichtungen (vergleichende Recherchen)*“ vom 14.12.2012 angegebenen Wärmeübergangskoeffizienten bei IR-Strahlung (s. Tabelle 8) einer grundlegenden Überprüfung zu unterziehen.

Tabelle 8: Wärmeübergangskoeffizienten konvektiv und bei Strahlung in $W/(m^2K)$

	Richtung des Wärmestromes		
	aufwärts	horizontal	abwärts
h_{ci}	3,92	3,92	3,92
h_{ri}	6,08	4,08	2,08
h_{ce}	15,40	15,40	15,40
h_{re}	9,60	9,60	9,60

- c) Ein Vergleich der Prüfbedingungen zwischen den einzelnen Prüfkörpern zeigt, dass größere Ungenauigkeiten bzw. Unsicherheiten in der Aussagekraft der Messwerte dann bestehen, wenn die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Teilkammern zu gering ist. Deshalb sollte prüftechnisch gewährleistet werden, die Temperaturdifferenz zwischen den Räumen beiderseits des Bauteils möglichst hoch einzustellen, um den Einfluss von Messfehlern klein zu halten. Die Lufttemperaturen zwischen den beiden Teilkammern der Prüfvorrichtung sollten eine Differenz von mindestens 10 bis 15 K haben.
- d) Um eine höhere statistische Sicherheit der Ergebnisse zu erhalten wird es erforderlich sein, für jeden Prüfkörperzustand mindestens fünf Prüfungen durchzuführen, Bei den Prüfkörpern 3 bis 6 kann – bezogen auf den berechneten Mittelwert – von einer relativ guten statistischen Sicherheit ausgegangen werden. Dies sollte auch bei den unbeschichteten Proben (Prüfkörper 1 und 2) und bei beidseitig und auch mehrfach beschichteten Proben im Rahmen weiterführender Untersuchungen garantiert werden.